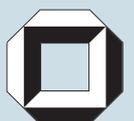
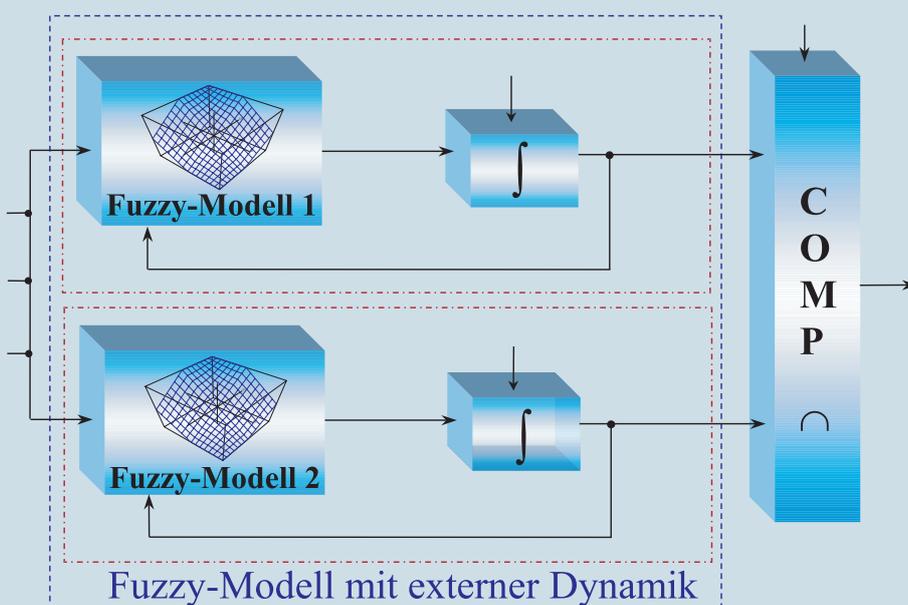


Dipl.-Ing. Anke Traichel

Neue Verfahren zur Modellierung nichtlinearer thermodynamischer Prozesse in einem Druckbehälter mit siedendem Wasser-Dampf Gemisch bei negativen Drucktransienten



Schriftenreihe des Instituts für
Angewandte Informatik / Automatisierungstechnik
Universität Karlsruhe (TH)
Band 3

Dipl.-Ing. Anke Traichel

**Neue Verfahren zur Modellierung
nichtlinearer thermodynamischer
Prozesse in einem Druckbehälter
mit siedendem Wasser-Dampf
Gemisch bei negativen
Drucktransienten**



Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Maschinenbau, 2004

Impressum

Universitätsverlag Karlsruhe
c/o Universitätsbibliothek
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

www.uvka.de

© Universitätsverlag Karlsruhe 2005
Print on Demand

ISSN 1614-5267
ISBN 3-937300-33-3

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Promotionsstudentin (Landesinnovationsstipendium des Landes Sachsen, SMWK) und wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik der Hochschule Zittau/Görlitz (FH) unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Hampel.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Georg Bretthauer (Universität Karlsruhe) für die fachliche und persönliche Betreuung der Arbeit und Unterstützung über einige Jahre hinweg sowie für die Übernahme des Hauptreferates.

Meinem Mentor und Korreferenten, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Hampel, danke ich für die Initiierung der Arbeit, die wissenschaftliche Förderung und die langjährige herzliche Betreuung. Ich danke ihm und den Kollegen der Fachgebiete Meßtechnik/Prozeßautomatisierung und Kerntechnik für die anregenden fachlichen Diskussionen, die Hinweise zur Anfertigung der Arbeit und das Korrekturlesen des Textes, was wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Ich möchte mich diesbezüglich speziell bei Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Kästner für die hervorragende und konstruktive Zusammenarbeit über den langen Zeitraum in der Forschungsgruppe Reaktorsicherheit bedanken.

In meinen Dank schließe ich auch Frau Friedel Jung und Herrn Dr.-Ing. Ralf Mikut vom Forschungszentrum Karlsruhe für die freundliche Unterstützung ein.

Weiterhin danke ich natürlich Ben Traichel sowie allen Verwandten und Freunden, die das Entstehen der Arbeit treu begleitet und unterstützt haben. Hierbei sei besonders meinen Eltern gedankt, ohne deren häufigen spontanen Einsatz bei der Kinderbetreuung die Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen wäre. Meinen Freunden aus der Kulturfabrik Mittelherwigsdorf gilt Dank für die zahlreiche energetische Unterstützung und das Mitfiebern, besonders meiner Freundin Astrid Schwarz für den wiederholten, unermüdlichen Beistand in allen tangierenden Lebensfragen.

Vor allem möchte ich mich bei meinen Kindern Tom, Nele und Wiebke bedanken, die so manche Stunde auf mich verzichten mußten, mir in den Streßzeiten verständnisvoll und lieb entgegengekommen sind und einfach toll sind.

Anke Traichel

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	V
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen.....	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Einordnung des Themas	1
1.2 Stand der Technik.....	4
1.2.1 Nichtlineare Systeme	4
1.2.2 Modellgestützte Meßverfahren (MMV) – Nichtlineare Beobachter.....	5
1.2.3 Verfahren des Soft Computing.....	6
1.2.3.1 Fuzzy-Set Theorie (FST)	7
1.2.3.2 Künstliche Neuronale Netze (KNN).....	8
1.2.3.3 Einsatz von Soft Computing Methoden in Beobachter- strukturen	9
1.2.4 Hybridverfahren	9
1.2.5 Druckbehältermodelle zur Beschreibung der Füllstandsmessung und Nachrechnungen mit dem ATHLET-Code	11
1.3 Offene Probleme.....	12
1.4 Zielstellung und Gliederung der Arbeit.....	14
1.4.1 Gesamtzielstellung	14
1.4.2 Einzelzielsetzungen.....	14
1.4.3 Gliederung.....	15
2 Nichtlineare Modelle für modellgestützte Meßverfahren.....	17
2.1 Klassische nichtlineare modellgestützte Meßverfahren	17
2.1.1 Modelle ohne Rückkopplung (Parallelmodell).....	18
2.1.2 Modelle mit Rückkopplung (Nichtlineare Beobachter).....	18
2.2 Modellbildung mit Verfahren des Soft Computing.....	20
2.2.1 Grundlagen und Methodik der Fuzzy-Modellbildung	21
2.2.2 Fuzzy-Modell mit externer Dynamik.....	25
2.3 Hybride Modelle.....	33
2.4 Schlußfolgerungen.....	33
3 Experimentelle und analytische Bestimmung des Füllstandes in Druckbehältern während negativer Drucktransienten	35
3.1 Experimente und Simulationen zur Bestimmung des Füllstandes	35
3.1.1 Füllstandsmessung am Druckbehälter.....	35
3.1.2 Generierung der Datenbasis	36
3.1.2.1 Beschreibung der Experimente	36
3.1.2.2 Simulationen mit dem ATHLET-Code.....	37
3.1.2.3 Ergebnisse	38

3.1.3	Signifikante Prozeßparameter	39
3.1.3.1	Wärmestrom.....	39
3.1.3.2	Meßbereichsüberschreitung, Meßbereichsunterschreitung.....	40
3.2	Nichtlineare Modellgleichungen	42
3.2.1	Erstellung des Zustandsraummodells.....	42
3.2.2	Bilanzgleichungen für den Druckbehälter	43
3.2.3	Nichtlineare Differentialgleichungen für den Massenfüllstand	44
3.2.4	Nichtlineare Zustandsgleichungen (Parallelmodell).....	46
3.3	Ergebnisse der Zustandsrekonstruktion mittels nichtlinearem Parallelmodell	46
3.4	Definition der Nichtlinearitäten und Unschärfen	48
3.5	Schlußfolgerungen.....	49
4	Nichtlineare Beobachter zur Bestimmung des Füllstandes	51
4.1	Klassische nichtlineare Beobachter.....	51
4.1.1	Formulierung der nichtlinearen Beobachtungsaufgabe	51
4.1.2	Streng Nichtlinearer Normalformbeobachter.....	53
4.1.3	Nichtlinearer PI-Arbeitspunkt-Beobachter	54
4.1.4	Ergebnisse der Simulation mittels nichtlinearem PI-Arbeitspunkt- Beobachter.....	54
4.1.5	Schlußfolgerungen	57
4.2	Neuer hybrider nichtlinearer PI-Arbeitspunkt-Beobachter	57
4.2.1	Struktur.....	57
4.2.2	Neues Fuzzy-Modell zur Beschreibung des physikalischen Parameters Wärmestrom.....	59
4.2.2.1	Vorbetrachtungen.....	59
4.2.2.2	Struktur	60
4.2.3	Zustandsrekonstruktion des Massenfüllstandes Zone 1 und 2 mittels des hybriden nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachters	70
4.2.3.1	Nachweis der Funktionsfähigkeit.....	70
4.2.3.2	Gültigkeitsbereich des hybriden Beobachters.....	72
4.3	Bewertung und Schlußfolgerungen.....	74
5	Neue fuzzy-basierte Parallelmodelle zur Bestimmung des Füllstandes.....	77
5.1	Vorbetrachtungen	77
5.2	Definition der Ein- und Ausgangsgrößen.....	78
5.2.1	Ausgangsgrößen.....	79
5.2.2	Eingangsgrößen.....	81
5.3	Neues Fuzzy-Parallelmodell zur Bestimmung des Massenfüllstandes (Nahbereich).....	83
5.3.1	Struktur.....	83
5.3.2	Kennfeldumschaltung	84
5.3.3	Basisregel	85
5.3.4	Zugehörigkeitsfunktionen	85

5.3.5	Regelbasis	87
5.3.6	Kennfeld.....	88
5.3.7	Darstellung der Rekonstruktionsergebnisse.....	89
5.3.7.1	Nachweis der Funktionsfähigkeit.....	89
5.3.7.2	Gültigkeitsbereich des Parallelmodells.....	92
5.4	Neues Fuzzy-Parallelmodell zur Bestimmung des Gemischfüllstandes	93
5.4.1	Struktur.....	93
5.4.2	Basisregel	94
5.4.3	Zugehörigkeitsfunktionen	94
5.4.4	Regelbasis	95
5.4.5	Kennfeld.....	96
5.4.6	Darstellung der Rekonstruktionsergebnisse.....	97
5.4.6.1	Nachweis der Funktionsfähigkeit.....	97
5.4.6.2	Gültigkeitsbereich des Parallelmodells.....	99
5.5	Bewertung und Schlußfolgerungen	100
6	Neues Konzept der kontinuierlichen Prozeßbeobachtung.....	103
6.1	Beschreibung des Konzeptes.....	103
6.2	Algorithmen zur Modellumschaltung	105
6.2.1	Verfahren zur Kombination der Modelle.....	105
6.2.2	Bestimmung der Umschaltkriterien	106
6.2.3	Umschaltfaktor.....	106
6.2.4	Fuzzy-Modell für die Umschaltung	107
6.2.4.1	Ein- und Ausgangsgrößen.....	107
6.2.4.2	Zugehörigkeitsfunktionen	107
6.2.4.3	Basisregel.....	108
6.2.4.4	Regelbasis	108
6.2.4.5	Kennfeld.....	109
6.3	Nachweis der Funktionalität der Umschaltalgorithmen zur Gemischfüllstandsbestimmung	109
6.4	Bewertung und Schlußfolgerungen	110
7	Zusammenfassung und Wertung	113
	Literaturverzeichnis.....	119
A 1	Experimente und Simulationsrechnungen zur Generierung der Datenbasis	131
A 1.1	Beschreibung der Versuchsanlage Druckbehältermodell (DHM) am Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik (IPM).....	131
A 1.2	Übersicht und Versuchsablauf der durchgeführten Experimente, Datenbasis	134
A 1.2.1	Experimentreihe 1	134
A 1.2.2	Experimentreihe 2	137
A 1.2.3	Versuchsablauf.....	141
A 1.3	Nachrechnung der Experimente mittels ATHLET.....	141

A 1.4	Datenanalyse	143
A 1.4.1	Datenanalyse der Experimentreihe 2 (kleine Blende).....	144
A 1.4.2	Datenanalyse der Experimentreihe 2 (große Blende)	147
A 1.5	Darstellung ausgewählter Prozeßdaten für Referenzarbeitspunkte.....	150
A 1.5.1	Referenzarbeitspunkte der Abblaseexperimente mit der kleinen Blende	150
A 1.5.2	Referenzarbeitspunkte der Abblaseexperimente mit der großen Blende	153
A 1.6	Detektion signifikanter Prozeßzustände und Prozeßwerte	155
A 1.6.1	Detektion der Druckstörung.....	155
A 1.6.2	Detektion des Anfangsdruckes und Anfangsmassenfüllstandes zu Beginn einer Druckentlastung (Druckstörung)	156
A 1.6.3	Detektion der maximalen Druckänderungsgeschwindigkeit und Massenfüllstandsänderungsgeschwindigkeit	157
A 2	Berechnung eines nichtlinearen Normalformbeobachters für das nodale Gemischraummodell.....	159
A 2.1	Beobachtbarkeitsanalyse - Berechnung der Nichtlinearen Beobachtbarkeitsnormalform (NBKNF).....	159
A 2.2	Berechnung der Nichtlinearen Beobachternormalform NBNF 2. Ordnung.....	162
A 3	Programmlistings zur Berechnung der Füllstände mittels DynStar.....	167
A 3.1	Programm zur Berechnung der Füllstände für das nodale Gemischraum- modell mit dem hybriden nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachter	167
A 3.2	Programm zur scharfen Umschaltung der Kennfelder für die Berechnung der Wärmeströme Zone 1 und 2, kleine und große Blende für das nodale Gemischraummodell	174
A 3.3	Programm zur Berechnung des Gemischfüllstandes mit dem fuzzy-basierten Parallelmodell.....	177
A 3.4	Definition der Fuzzy-Variablen, der Zugehörigkeitsfunktionen und der Regelbasis zur Berechnung des Gemischfüllstandes mit dem fuzzy-basierten Parallelmodell.....	180
A 3.5	Programm zur Umsetzung der Umschaltalgorithmen für die kontinuierliche Prozeßbeobachtung	182

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Formelzeichen

A	- Systemmatrix des Prozesses
A	- Querschnittsfläche
B	- Steuermatrix des Prozesses
α	- Wärmeübergangszahl
d_{Bl}	- Durchmesser der Blende
$\frac{dE}{dt}$	- zeitliche Änderung der Energie
$\frac{dh_{m_w}}{dt}$	- Änderungsgeschwindigkeit (Gradient) meßbarer Massenfüllstand (Weitbereich)
$\frac{dK_n}{dt}$	- zeitliche Ableitung des Verhältnisfaktors meßbarer Massenfüllstand (Nahbereich)
$\frac{dm}{dt}, \dot{m}$	- zeitliche Änderung der Masse, Massenstrom
$\frac{dp}{dt}, dp/dt$	- Druckänderungsgeschwindigkeit, Druckgradient
$\frac{d\dot{Q}}{dt}$	- Gradient des Wärmestromes (Wärmestromänderungsgeschwindigkeit)
$\frac{dT}{dt}$	- Temperaturgradient
$\frac{\partial h}{\partial p}$	- partielle Ableitung der Enthalpie nach dem Druck
$\frac{\partial \rho}{\partial p}$	- partielle Ableitung der Dichte nach dem Druck
Druckstörung	- Signal Druckstörung (Detektion Beginn und Ende der Störung)
f, h	- nichtlineare Funktion
F_MOD	- Modellfaktor für die Umschaltung des Gesamtsystems
$\bar{\varphi}, \varphi$	- Volumendampfgehalt, mittlerer Dampfgehalt
h	- Füllstand; Enthalpie (Wasser, Dampf)
H	- Bezugsfüllstand
hg	- Gemischfüllstand
hm	- Massenfüllstand

X

K	- Verstärkungsmatrix
K_0, K_1	- Koeffizienten der Verstärkungsmatrix für ein System 2. Ordnung
$k_{1...8}$	- nichtlineare Koeffizienten der nichtlinearen Zustandsdifferentialgleichungen des nodalen Gemischraummodells (abhängig von Druck und Enthalpie)
$k_{a,b,c,d}$	- Abkürzungen für die nichtlinearen Koeffizienten der nichtlinearen Zustandsdifferentialgleichungen des nodalen Gemischraummodells
K_g	- Verhältnisfaktor für den Gemischfüllstand
K_n	- Verhältnisfaktor für den meßbaren Massenfüllstand (Nahbereich)
$K_n _s$	- Anfangswert des Verhältnisfaktors für den meßbaren Massenfüllstand (Nahbereich) bei Beginn der Störung
λ	- Eigenwert
N_KF	- Kennfeldfaktor für die Umschaltung der Kennfelder für den Massenfüllstand (Nahbereich)
p	- Druck
Δp	- Differenzdruck
ρ	- Dichte
q(t)	- Ausgangsgröße des Fuzzy-Modells
\dot{Q}	- Wärmestrom
\dot{Q}_KF	- Kennfeldfaktor für die Umschaltung der Kennfelder für den Wärmestrom
t	- Simulationszeit, Beobachtungszeit
T	- Zeitkonstante, Temperatur
t_A	- Abtastzeit
T_{Klein}	- kleinste Zeitkonstante
u, u(t)	- Eingangsgröße
V	- Volumen
v(t)	- deterministische Störung
w''	- Dampfblasengeschwindigkeit
x(t)	- Zustandsgröße
y(t)	- Systemausgangsgröße, Meßgröße
z	- konstante Zonenhöhe
Δz	- veränderliche Zonenhöhe
z(t)	- stochastische Störung

Indizes

ab	- abströmend
akt	- aktueller Wert
AS	- aktueller Druckwert bezogen auf den Druckanfangswert bei Beginn einer Störung (Druckänderung)
ATH	- Prozeß (ATHLET-Code)
BEH	- Bezeichnung für den fiktiven Füllstandsverlauf
BEO	- Beobachter
h_BEO	- hybrider nichtlinearer PI-Arbeitspunkt-Beobachter (Hybridbeobachter)
l_BEO	- linearer Beobachter
nl_BEO	- klassischer nichtlinearer PI-Arbeitspunkt-Beobachter
BER	- berechnet
BER_M	- berechnet innerhalb der Meßbereichsgrenzen
BER_O	- berechnet oberhalb der Meßbereichsgrenze
BER_U	- berechnet unterhalb der Meßbereichsgrenze
Bl	- Blende
d	- dynamisch
FUZ	- Fuzzy-Modell
groß	- hoher Parameterbereich für Blendendurchmesser $d_{Bl} = 5$ mm (große Druckänderungsgeschwindigkeit)
i	- Zone i, untere Zone im nodalen Gemischraummodell; Laufindex
j	- Zone j, obere Zone im nodalen Gemischraummodell
k	- k-ter Zeitschritt
k	- klassisch
klein	- niedriger Parameterbereich für Blendendurchmesser $d_{Bl} = 2$ mm (geringe Druckänderungsgeschwindigkeit)
m, n	- Anzahl von Größen
PM	- Parallelmodell
stör_a	- Anfangsdruck bei Beginn der Störung (während der Störung konstant)
SYS	- Gesamtsystem
n	- Nahbereich
g	- Gemisch
oE	- obere Einbindung
p	- Pattern
uE	- untere Einbindung
w	- Weitbereich

W	- Wasser
z0	- Zustand z0 (Anfangszustand)
zu	- zuströmend
0	- Anfangszustand
1...n	- Anzahl der Größen
^	- durch den Beobachter rekonstruierte Größen
~	- Rekonstruktionsfehler
—	- Vektor
·	- zeitliche Ableitung
‘	- Wasser bei Siedeparametern
’’	- Dampf bei Siedeparametern
1	- Bezeichnung des nichtmeßbaren Massenfüllstandes in der unteren Zone im nodalen Gemischraummodell
2	- Bezeichnung des meßbaren Massenfüllstandes in der oberen Zone im nodalen Gemischraummodell
$ _{\max}$	- Maximalwert im Arbeitspunkt
$ _s$	- Anfangswert bei Beginn der Störung im Arbeitspunkt

Abkürzungen

AHB	- Algorithmus zur Füllstandsberechnung
ATHLET-Code	- komplexer Rechencode zur Analyse der Thermohydraulik von Lecks und Transienten (ATHLET)
BLDN, BD	- Abblasen (Abblasevorgang)
DGL	- Differentialgleichung
DHM	- Versuchsanlage Druckbehältermodell am IPM
DynStar	- komplexes Simulationsprogramm für Automatisierungstechniker mit integrierter Fuzzy-Shell
EKPG	- Einkammerpegelgefäß
Exp.	- Experiment (Abblaseexperiment)
F_	- Faktor
FM	- Fuzzy-Modell
FST	- Fuzzy-Set Theorie
IPM	- Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik, Hochschule Zittau/Görlitz (FH)
KNN	- Künstliche Neuronale Netze

ling.	- linguistisch
MIMO	- Multi Input Multi Output (System mit mehreren Ein- und Ausgangsgrößen)
MLP	- spezielle Form eines \rightarrow KNN, Multilayer Perzeptron
MMV	- modellgestützte Meßverfahren
NKPG	- Nullkammerpegelgefäß
MOD (M)	- Modell
NBNF	- Nichtlineare Beobachternormalform
NBKNF	- Nichtlineare Beobachtbarkeitsnormalform
NETTOOL	- Programm zur Generierung von \rightarrow MLP mit Integrationsmöglichkeit in \rightarrow DynStar
NLDM	- nichtlineares dynamisches Modell
NLDFM	- nichtlineares dynamisches Fuzzy-Modell
NG	- linguistischer Term NEGATIV GROSS
NK	- linguistischer Term NEGATIV KLEIN
NM	- linguistischer Term NEGATIV MITTEL
NM	- nichtlineares Modell
NMG	- linguistischer Term NEGATIV MITTELGROSS
NSK	- linguistischer Term NEGATIV SEHR KLEIN
NSG, NS	- linguistischer Term NEGATIV SEHR GROSS
NR	- nichtlineare Rückführung
OMG	- obere Meßbereichsgrenze
UMG	- untere Meßbereichsgrenze
PG	- linguistischer Term POSITIV GROSS
PI	- Proportional-Integral Glied
PK	- linguistischer Term POSITIV KLEIN
PM	- linguistischer Term POSITIV MITTEL
PS	- linguistischer Term POSITIV SEHR GROSS
PT1	- Verzögerungsglied 1. Ordnung
s.	- siehe
z^{-1}	- z-Transformation
ZE, ZR	- linguistischer Term ZERO (NULL)
ZGF	- Zugehörigkeitsfunktion
ZKPG	- Zweikammerpegelgefäß

1 Einleitung

1.1 Einordnung des Themas

Für eine kontinuierliche Prozeßüberwachung und –beobachtung in komplexen, sicherheitsrelevanten Systemen ist die Bereitstellung von Informationen zum aktuellen Prozeßzustand in Form von meßbaren und nichtmeßbaren Zustandsgrößen erforderlich. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf thermodynamische Prozesse in Druckbehältern mit siedendem Zweiphasengemisch Wasser-Dampf (Siedewasserreaktoren, Druckhalter, Dampferzeuger). Diese sind durch dynamische Nichtlinearitäten und damit Unsicherheiten im Prozeßverlauf infolge betriebs- und störfallbedingter Übergangsvorgänge und Transienten gekennzeichnet. Es existieren Modellungenauigkeiten und Unschärfen durch die Vielzahl der auftretenden Abhängigkeiten und Komplexität aller möglichen Abläufe und Einzeleffekte (Fuzziness von Systemen). Dennoch laufen die Prozesse in einem reproduzierbaren technologischen Rahmen ab.

Die höheren Anforderungen an die Sicherheit, Zuverlässigkeit und Güte (Qualität) der verfügbaren Prozeßinformationen, insbesondere in Störfallsituationen, erfordern den Einsatz intelligenter, moderner Verfahren der Signalverarbeitung. Deutlich unterstrichen wird das in [Hamp99-2; Käst00-1; Leiv98; Panr99], wo u. a. Modellierungskonzepte für komplexe Prozeßmodelle mit vertretbarem Aufwand gefordert werden. Die Exaktheit der Modelle ist so genau wie prozeßspezifisch notwendig und nicht so genau wie möglich zu gestalten. Zur Modellierung wird Erfahrungs- bzw. Expertenwissen über den qualitativen Prozeßablauf und Wissen auf der Basis vorhandener realer und experimenteller Daten in effizienter Form und vorteilhaft eingesetzt.

Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit ist die Annahme, daß durch die Kombination analytischer Verfahren und Verfahren des Soft Computing (Fuzzy-Set Theorie (FST) oder Künstliche Neuronale Netze (KNN) [Bezd94]) zur Beschreibung von Prozessen mit Unschärfen eine neue Qualität der Prozeßbeobachtung und -überwachung zur Bereitstellung der erwünschten Prozeßinformation erreicht werden kann (Bild 1-1).

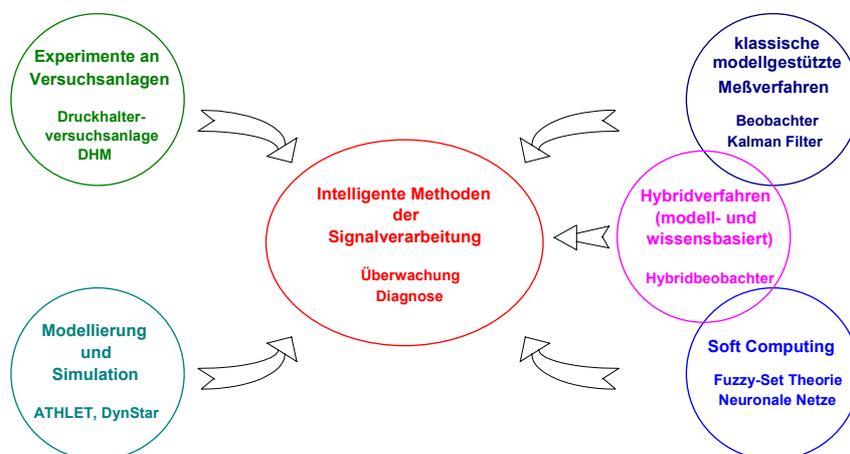


Bild 1-1: Komponenten für den Entwurf intelligenter Methoden der Signalverarbeitung [Hamp99-2]

Als analytische Verfahren, die zur Bestimmung meßbarer und nichtmeßbarer Zustandsgrößen geeignet sind, kommen modellgestützte Meßverfahren (MMV) in Form von nichtlinearen Beobachtern zur Anwendung. Die Intention des Einsatzes nichtlinearer modellgestützter Meßverfahren ist die Entwicklung neuer Verfahren anhand der Modellierung der Füllstandsdynamik im Druckbehälter während betriebs- und störfallbedingter negativer Drucktransienten zur Verbesserung der Überwachung des aktuellen Prozeßzustandes. Die rechte Seite im Bild 1-1 repräsentiert die Entwicklung von Hybridverfahren unter Nutzung der klassischen und Soft Computing Verfahren. Unter Nutzung der Datenbasis für den Entwurf und den Test der neuen Verfahren für das vorliegende Prozeßbeispiel (linke Seite, in Form von Experimenten an der Versuchsanlage und Simulationen mit dem ATHLET-Code) werden somit intelligente Methoden der Signalverarbeitung zur Überwachung entwickelt. Das Gesamtziel ist die kontinuierliche Beobachtung und Überwachung des Füllstandes als sicherheitsrelevante Größe in einem Druckbehälter mit siedendem Wasser-Dampf Gemisch.

Das Bild 1-2 veranschaulicht das Gesamtsystem Druckbehälter mit den hydrostatischen Füllstandsmeßsystemen (Differenzdruckmeßverfahren) zur Bestimmung des Massenfüllstandes (Weit- und Nahbereich) [Trai00].

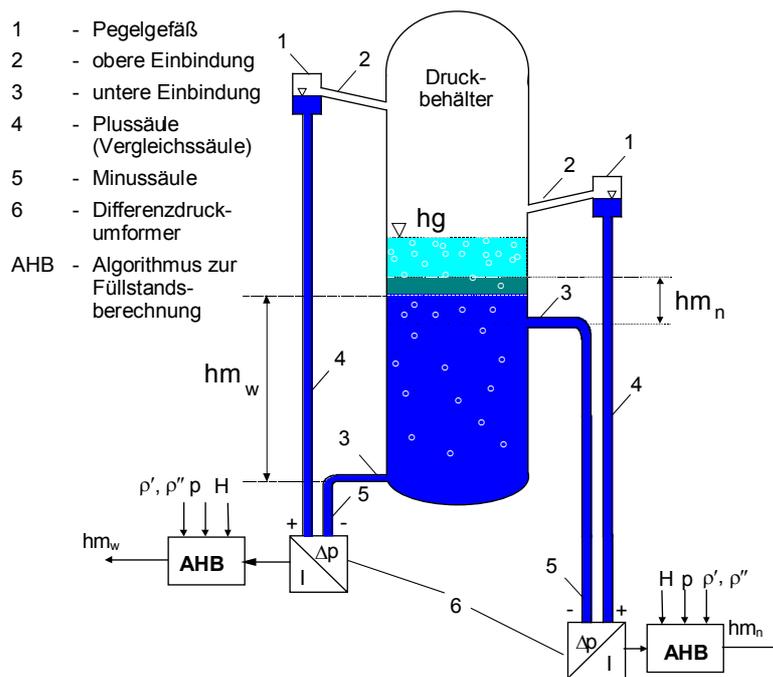


Bild 1-2: Hydrostatische Füllstandsmeßsysteme an der Versuchsanlage DHM und Darstellung der charakteristischen, sich ausbildenden Füllstände

Durch negative Drucktransienten (plötzliche Druckentlastungen) wie bei Leckstörfällen treten starke Änderungen des Dampfgehaltes auf. Dadurch wird die Aufspreizung des Gemischfüllstandes und des Massenfüllstandes (Nahbereich) gegenüber dem Massenfüllstand (Weitbereich) hervorgerufen, die entscheidend vom Zustand vor der Störung abweichen. Im Druckbehälter ist der Füllstand wie folgt zu definieren:

⇒ hm_w - Massenfüllstand (Weitbereich) - meßbare, globale Zustandsgröße, die dem Wasserinventar im Druckbehälter entspricht (zuverlässig und robust),

- ⇒ h_g - Gemischfüllstand - nichtmeßbare, globale Zustandsgröße, die die Grenze zwischen dem Wasser-Dampf Gemisch und der reinen Dampfphase definiert (wahrer Füllstand),
- ⇒ h_{m_n} - Massenfüllstand (Nahbereich) - meßbare, lokale Zustandsgröße, Repräsentation des Wasserinventars im Druckbehälter zwischen den Einbindungen des Nahbereichsmeßsystems.

Die Dampfbildung in den Zonen unterhalb der unteren Einbindung und zwischen den Einbindungen hat bei störungsbedingten Übergangsvorgängen mit negativen Drucktransienten einen wesentlichen Einfluß auf die Ausbildung des Massenfüllstandes (Nahbereich) und den Gemischfüllstand. Der Dampfgehalt unterhalb der unteren Einbindung und zwischen den Einbindungen des Nahbereichsmeßsystems ist mit herkömmlichen Methoden nicht meßbar. In Zusammenhang mit den negativen Drucktransienten ist das Auftreten folgender Problemfälle möglich:

- ⇒ Anschlagen des Gemischfüllstandes an das Sicherheitsventil,
- ⇒ Gefährdung der Wärmeübertragerflächen durch deren Freilegung,
- ⇒ Gefährdung von Einbauten und nachgeschalteten Anlagen durch zu hohe Dampffeuuchte (z. B. System Dampferzeuger-Turbine),
- ⇒ Austreten von (kontaminiertem) Zweiphasengemisch,
- ⇒ Beschränkung des Druckabbaus bei Austritt von Zweiphasengemisch beim Abblasen.

Außerdem tritt durch die plötzliche Druckentlastung aufgrund der Temperaturänderung ein Wärmestrom zwischen der Behälterwand und dem Wasser-Dampf Gemisch als Prozeßstörung auf, der anlagen- und prozeßspezifisch berücksichtigt werden muß. Der Wärmestrom besitzt nichtlineares Übertragungsverhalten und ist analytisch aufgrund der notwendigen Kenntnis der Wärmeübergangszahl α nur aufwendig beschreibbar.

Die Ergebnisse vorangegangener Untersuchungen zeigten, daß durch den Einsatz von Verfahren der analytischen Redundanz wie modellgestützte Meßverfahren für den Druckbehälter mit hydrostatischem Füllstandsmeßsystem während negativer Drucktransienten eine Verbesserung der Exaktheit und Zuverlässigkeit der Informationen über den Prozeßzustand erzielt wird [Hamp94-3, 94-4, 97]. Bisher erfolgte die Beschreibung von Übergangsvorgängen und Transienten im Druckbehälter zur Prozeßbeobachtung mit linearen modellgestützten Meßverfahren ohne und mit fuzzy-basierter Adaption und einem linearisierten Parallelmodell. Diese weisen hinsichtlich ihrer Gültigkeit im gesamten Parameterbereich, Beobachtungszeitraum und des Einflusses von Nichtlinearitäten (z. B. Prozeßstörungen) Einschränkungen auf.

Das Ziel der Arbeit besteht darin, neue Verfahren des Soft Computing [Bezd94] zur Modellierung der Unsicherheiten und Unschärfen sowie der Nichtlinearitäten bei der Prozeßbeschreibung innerhalb der klassischen modellgestützten Meßverfahren zu entwickeln und zu kombinieren, um damit die Gültigkeit der klassischen nichtlinearen Beobachter zu erweitern. Dabei entstehen neue, fortgeschrittene hybride modellgestützte Meßverfahren mit hoher Transparenz zur Erstellung von nichtlinearen Modellen für nichtlineare Prozesse. Das Ergebnis ist ein

echtzeitfähiges Modell mit dem Ziel eines späteren Einsatzes in der Praxis (on-line). Angestrebt wird eine Erhöhung der Güte und Zuverlässigkeit der Bereitstellung der Informationen auf der Grundlage der Vielfalt der möglichen Modellredundanzen.

Die experimentelle Verifikation der Modelle und der neuen Verfahren erfolgt an der Versuchsanlage Druckbehälter (DHM) des Instituts für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik (IPM), welche mit hydrostatischen Füllstandsmeßsystemen in unterschiedlichen Meßbereichen ausgestattet ist. Mit der Versuchsanlage können thermodynamische Einzeleffekte wie Sieden an Heizstäben (Ausbildung von axialen Dampfgehaltsverteilungen) und Ausbildung des Gemischfüllstand nachgebildet werden. Der komplexe Thermohydraulikrechencode ATHLET (Analyse der Thermohydraulik von Lecks und Transienten) wird für den Nachweis von Einzeleffekten und die Berechnung und Bereitstellung nichtmeßbarer Größen sowie die Verifikation der neuen Verfahren und Methoden und deren off-line Test verwendet. Die für die Simulation notwendigen Programmodule werden mit dem Programmsystem DynStar erstellt. Die erzielten Ergebnisse können auf reale Anlagen übertragen werden, da im Grundsatz die Füllstandsmessung am DHM vergleichbar mit der an einem Siedewasserreaktor ist.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur Modellierung nichtlinearer Prozesse mit nichtlinearen Methoden. Dabei wird zur Bewertung des Einsatzes hinsichtlich der Vielfalt der Beschreibungsmöglichkeiten eine Zusammenstellung und Kopplung der Modellredundanzen vorgenommen. Mit der Entwicklung der Methodik zu fortgeschrittenen modellgestützten Meßverfahren kann eine kontinuierliche Prozeßbeobachtung gewährleistet werden.

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Nichtlineare Systeme

Das dynamische Verhalten von komplexen technischen, dynamischen Prozessen wird häufig mit den Mitteln der linearen Theorie untersucht. Vorteile dabei sind die einfache analytische Beschreibung und das geltende Verstärkungs- und Superpositionsprinzip [Acke83]. Sind nichtlineare Prozesse zu überwachen und zu beobachten, so muß wegen der auftretenden Phänomene der nichtlineare Systemcharakter unbedingt beachtet werden [Solo74, Unbe94]. Nichtlineare Gleichungen sind immer dann anzuwenden, wenn:

- ⇒ das System im Arbeitspunkt nicht linearisierbar ist,
- ⇒ der Linearisierungsfehler zu groß ist,
- ⇒ der Prozeß sich vom Arbeitspunkt wegbewegt,
- ⇒ Nichtlinearitäten mit Einfluß auf das statische und dynamische Verhalten des Prozesses vorhanden sind.

Für die Untersuchung nichtlinearer Systeme werden die ursprünglichen Differentialgleichungen im Zeitbereich zugrundegelegt, die das physikalische System mit Hilfe von Ein- und Ausgangsgrößen beschreiben. In der Zustandsraumdarstellung wird das System durch Zustandsgrößendifferentialgleichungen beschrieben [Freu87-1, 2]. Die Zustandsraumdarstel-

lung bietet bessere Übersicht und Nachvollziehbarkeit der physikalischen Vorgänge im nicht-linearen Bereich, weil als Zustandsgrößen meist eindeutige physikalische Größen gewählt werden [Marg67]. Die Beschreibung und Klassifikation der Struktur der Nichtlinearitäten in dynamischen Systemen erfolgt nach dem Ursache-Wirkungs-Prinzip. Die Nichtlinearitäten sind bei der Modellbildung zu berücksichtigen und in geeigneter Weise zu beschreiben. Zur Behandlung von Klassen nichtlinearer Probleme stehen Verfahren zur Verfügung, jedoch gibt es keine allgemeine Theorie nichtlinearer Systeme [Fens93, 97-1].

Charakterisiert sind die auftretenden Nichtlinearitäten durch:

- ⇒ strukturelle Nichtlinearitäten des Modellansatzes (Multiplikation/Division von zeitveränderlichen Größen),
 - von n Zustandsgrößen, $x_1(u, t) \cdot x_2(u, t) \cdot \dots \cdot x_n(u, t)$,
 - von n Zustands- und m Eingangsgrößen, $u_m(t) \cdot x_n(u, t)$,
- ⇒ nichtlineare Abhängigkeit der Koeffizienten der Differentialgleichungen,
- ⇒ Nichtlinearitäten infolge der Änderung des Anlagen- und Betriebszustandes.

1.2.2 Modellgestützte Meßverfahren (MMV) – Nichtlineare Beobachter

Die Anwendung modellgestützter Meßverfahren für die Führung und Überwachung von Prozessen setzt die Kenntnis des Prozesses in Zustandsraumdarstellung, den Entwurf von entsprechenden Beobachtungsverfahren sowie deren Echtzeit-Realisierung voraus [Gill87]. Klassische modellgestützte Meßverfahren sind eine Form der analytischen Redundanz, die für die Bestimmung nichtmeßbarer Zustandsgrößen geeignet sind. Dem Prozeß wird ein hinreichend genau bekanntes mathematisches Zustandsraummodell parallel geschaltet, dem die meßbaren Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen zugeführt werden. Durch dieses Modell wird eine Rekonstruktion der meßbaren und nichtmeßbaren Zustandsgrößen des Prozesses realisiert. Dabei werden als Zustandsgrößen eindeutige physikalische Größen gewählt, um eine gute Interpretierbarkeit zu gewährleisten.

Die Theorie der linearen modellgestützten Meßverfahren zur mathematischen Beschreibung von Prozessen gilt inzwischen als im Wesentlichen abgeschlossen [Jela97]. Um den Bereich des Arbeitspunktes wird durch einen linearen Beobachter eine hohe Rekonstruktionsgüte erreicht. Für die Analyse und Beobachtersynthese nichtlinearer Systeme existiert keine einheitliche, allgemeingültige Theorie. Aufgrund des Charakters der Nichtlinearitäten, der Sicherung der Beobachtbarkeit und Stabilität, liegen beim Entwurf die Probleme in der gewünschten Dynamik [Föll89]. Die entwickelten Entwurfsverfahren sind vielfach nur für spezielle Anwendungsfälle und bestimmte Systemklassen einsetzbar [Bär87; Best83; Fens93; Jela97; Kell86-1, 2; Kou73, 75; Kren83, 85; Thau73; Zeit84]. Die mathematische Handhabung der Nichtlinearitäten erweist sich bei der Analyse und Synthese des komplexen Systems als äußerst kompliziert [Göld68, 82; Kubi83]. Eine nichtlinear zu dimensionierende Rückführung für wenige Systemklassen ohne eine Berücksichtigung von Verkopplungen der Eingangsgrößen wird in [Kell86-1, 2] vorgeschlagen. Verschiedene klassische Beobachterkonzepte auch mit nichtlinearen Rückführungsstrukturen wurden in [Birk92; Enge95]

zusammengefaßt. Die Auslegung bei den Beobachterentwürfen erweist sich auch hier als schwierig. Die Anfangsbedingungen müssen exakt bestimmt werden, da das Verhalten nichtlinearer Systeme empfindlich vom Anfangszustand abhängt. In [Birk92] wird auch der rechnergestützte Entwurf von nichtlinearen Beobachtern angeboten. Das Programm gilt für eine Klasse nichtlinearer Systeme, die nicht die Verknüpfung von Zustandsgrößen und Eingangsgrößen beinhalten. Der analytische Aufwand für die veröffentlichten, klassischen Entwurfsmethoden ist hoch und die Bedingungen für die Existenz dieser Beobachter sind sehr restriktiv. Oft wird auf linearisierbare Anteile oder linearisierte Multimodellentwürfe zurückgegriffen. Nichtlineare Beobachter müssen jedoch immer dann eingesetzt werden, wenn die Rekonstruktionsgüte der mit linearen Methoden berechneten Werte nicht ausreichend ist bzw. die Modellbildung von vornherein zu nichtlinearen Modellen führt.

Der Einsatz modellgestützter Meßverfahren für Druckbehälter in Zusammenhang mit Zustandsreglern und zur Fehlererkennung wird in [Dett76; Proc89] beschrieben. Dabei finden die nichtmeßbaren Zustandsgrößen Gemischfüllstand bzw. Dampfgehalt keinen Eingang in das Zustandsraummodell. Modellgestützte Meßverfahren mit Rückkopplung auf der Basis von linearen Zustandsraummodellen, auch Filter und adaptive Methoden, wurden in [Hamp94-4, 95-2; Käst96] auf Anwendbarkeit zur Bestimmung von sicherheitsrelevanten nichtmeßbaren Zustandsgrößen wie Massenfüllstand unterhalb der unteren Einbindung und Gemischfüllstand in Druckbehältern getestet. Im Ergebnis dessen wurde ein linearisiertes Zustandsraummodell entwickelt, was die Bestimmung des Massenfüllstandes (Nahbereich) im Druckbehälter als Funktion der Druckänderungsgeschwindigkeit gestattet.

Die praktische Anwendung der modellgestützten Meßverfahren wurde bisher vor allem in der chemischen und verfahrenstechnischen Industrie sowie in der Fahrzeug- und Antriebstechnik realisiert [Zeit77, 79; Birk92; Buch94; Gest01; Seid81]. In [Gest01] werden beispielsweise der Erweiterte Kalman Filter und der Sliding Mode Observer für die Prozeßvisualisierung von nichtlinearen Polymerisationsprozessen mit Analyse der Beobachtbarkeit der entwickelten Prozeßmodelle angewendet.

1.2.3 Verfahren des Soft Computing

Der Einsatz von Verfahren des Soft Computing wie Fuzzy-Set Theorie und KNN [Bezd94; Zade94] in Forschung und Industrie hat in der letzten Zeit erheblich zugenommen [Leiv98]. Der Grund dafür ist, daß die klassischen Verfahren und die klassische Logik Defizite bei der Formulierung von Lösungen zeigen. Vor allem mit der Programmierung von leistungsfähigen Fuzzy- und Neuro-Shells nahmen die Anwendungen erheblich zu. Der Vorteil beider Methoden besteht darin, daß die Informationen (a-priori Prozeßwissen, Erfahrungs- und Expertenwissen) über den zu beschreibenden Prozeß in Form eines charakteristischen Kennfeldes abgelegt sind, welches eine universelle nichtlineare Übertragungsfunktion abbildet, die den spezifischen Prozeßbedingungen durch Lernen oder Modifikation von Regeln angepaßt werden kann [Heis95; Leic95; Nell97]. Im KNN ist das Wissen über die Übertragungsfunktion im Kennfeld durch die Wichtung der Neuronen über das ganze Netz verteilt. Das Wissen ist im Fuzzy-Kennfeld aufgrund der Regelbasis stärker strukturiert und damit einfacher interpretierbar. Die einheitliche Behandlung von Ein- und Mehrgrößensysteme-

men stellt einen weiteren Vorzug dar. KNN werden meist eingesetzt bei Vorhandensein großer Datenmengen, während bei Existenz von Expertenwissen Fuzzy-Modelle erstellt werden.

1.2.3.1 Fuzzy-Set Theorie (FST)

Die Fuzzy-Set Theorie wird angewendet, da auf der Grundlage einer vorhandenen Datenbasis eine interpretierbare, regelbasierte Beschreibung des globalen, nichtlinearen Übertragungsverhaltens der Zustandsgröße ohne detaillierte Kenntnis physikalischer Einzelgrößen und Teilprozesse möglich ist. Das gesamte Wissen über die Größe ist in dem entstehenden Kennfeld abgelegt. Die Art der Wissensrepräsentation ist bei der Fuzzy-Set Theorie aufgrund der Regelbasis übersichtlich und explizit.

Die Applikation der Fuzzy-Set Theorie erfolgt vor allem auf dem Gebiet der Regelungstechnik [Bien92; Chak96; Hah94; Hamp94-1; Kien97; Leve91; Mich95] und der Modellierung, Mustererkennung, Klassifikation und Datenanalyse [Bock94; Bret98; Küpp96; Stem00]. In [Hah94; Leve91] wird als Anwendung ein Fuzzy-Regler Algorithmus für einen Druckwasserreaktor vorgestellt. Fuzzy-Regler haben sich bei bestimmten Problemstellungen als optimal herausgestellt. Weiterhin wird die Fuzzy-Set Theorie auf dem Gebiet der Entscheidungstheorie bei der Überwachung von Prozessen (Fuzzy-Supervision) [Fran94, 96] und zur Residuengenerierung [Chen99] für die Fehlerdetektion in nichtlinearen Systemen eingesetzt. Außerdem können mit der unscharfen Beschreibung Prozeßzustände analysiert und überprüft werden [Hamp94-2; Worl93]. In [Chak96, 98] erfolgt die Beschreibung einer Methode zur Kaskadierung von hochdimensionalen Kennfeldern in niedrigdimensionale Strukturen unter Nutzung von virtuellen Variablen, um die Transparenz und das Verarbeitungsspektrum mehrdimensionaler Modelle zu erhöhen.

Eine ähnliche Vorgehensweise der Kaskadierung für den (regelungstechnisch orientierten) automatischen Entwurf von Fuzzy-Controllern wird in [Steil96] vorgeschlagen. Dabei werden auch dynamische Fuzzy-Strukturen unter Nutzung der z-Transformation beschrieben. Die Rückführung von Ausgangsgrößen auf den Eingang wird mit Hilfe Genetischer Algorithmen realisiert. Damit entsteht ein für hochdimensionale Systeme aufwendig durchzuführendes Mischkonzept.

In der letzten Zeit wurde zunehmend die Entwicklung dynamischer Fuzzy-Modelle zur Anwendung auf nichtlineare dynamische Prozesse, vor allem zur Regelung, verfolgt. Eine Identifikation dynamischer Fuzzy-Modelle auf der Basis von Takagi-Sugeno Modellen wird in [Cao95] gezeigt. In [Fisc99] werden ebenfalls Takagi-Sugeno Modelle im Zusammenhang mit der Regelung eines Prozesses (Kreuzstromwärmetauscher) zur Modellierung des nichtlinearen dynamischen Prozesses eingesetzt. Dabei wird eine Verknüpfung von theoretischer und experimenteller Modellbildung (Identifikation) vorgenommen. Die Transparenz der Modelle wird bei einer vorwissengesteuerten Adaption des Fuzzy-Modells auf meßbare Störgrößen ausgenutzt. Eine Möglichkeit zur qualitativen Prozeßmodellierung mit Identifikation mittels eines dynamischen Fuzzy-Modells wird in [Schä99; Schm99] angeboten. Der entwickelte Inferenzmechanismus beruht auf interpolierenden Regeln, mit denen wenig besetzte Regelbasen aufgefüllt werden können. Die praktische Anwendung bleibt für

komplexe, nichtlineare dynamische Systeme durch die Rückführung unscharfer Werte (vor der Defuzzifizierung) innerhalb des dynamischen Fuzzy-Systems kompliziert.

Ein nichtlineares dynamisches Fuzzy-Netzwerkmodell zur Anwendung in einer nichtlinearen modellprädiktiven Regelung für einen hydraulischen Antrieb wird in [Krol00] beschrieben. Das dynamische Verhalten wird dabei durch die extern rekurrente Modellstruktur möglich. In der Rückführung des Fuzzy-Regelwerkes werden historische Werte der prädizierten Regelgröße verwendet. Die genannten Beispiele beweisen eindeutig die Richtung, nichtlineare Vorgänge und Prozesse mit Hilfe von dynamischen Fuzzy-Modellen abzubilden.

1.2.3.2 Künstliche Neuronale Netze (KNN)

Ein KNN ist ebenfalls ein universeller Approximator. In der dem Netzwerkdesign folgenden Lernphase lernt ein KNN mehrdimensionale, nichtlineare, beliebige Beziehungen zwischen Ein- und Ausgabe über die verdeckte Schicht. Für die ausführliche Beschreibung der Lernverfahren, sowie statischer und dynamischer Netzwerkarchitekturen sei auf die Literatur verwiesen [Hoff93; Nell97; Ritt91]. Die Anzahl der Neuronen in den einzelnen Schichten entscheidet über die Qualität und die Zeit des Lernvorgangs und damit die Rekonstruktionsgüte. Die Beziehungen zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen sind in Form der nichtlinearen Übertragungsfunktion in dem entstehenden Kennfeld abgelegt. KNN können aufgrund der verteilten Wissensrepräsentation in der verdeckten Schicht sehr gut mit vertauschten und unscharfen Daten umgehen, die zusätzlich noch ein hohes Maß an Inhomogenität aufweisen können. Für die Trainingsphase des KNN ist eine hohe Anzahl von Daten notwendig, um die gewünschte Eingangs-Ausgangs-Beziehung mit einer akzeptablen Abweichung zum Prozeß herzustellen. Die Lernfähigkeit eines KNN ist im Vergleich zu anderen Verfahren der entscheidende Vorteil. KNN sind in der Arbeitsphase schneller als herkömmliche Methoden sowie on-line lernfähig und adaptierbar. Die Entwicklungszeit (Lernen, Training und Test) und die Erstellung der notwendigen hohen Anzahl von Datensätzen nimmt einen ungleich größeren Raum ein.

Die Anwendung von KNN erfolgt gegenwärtig in einer Vielzahl von Bereichen wie Regelungstechnik, Robotersteuerung, Bildverarbeitung, Datenanalyse und Diagnosesystemen [Bitz98; Braz95; Hess96; Otto95; Tudo98]. Im wesentlichen werden statische Nichtlinearitäten mit KNN approximiert [Hush93; Mart96; Ritt91]. Um auch dynamische Probleme abbilden zu können, werden verschiedene Arten von KNN mit externer oder interner Dynamik in der Literatur aufgeführt [Basu94; Nare90; Nell97; Nikr96].

Eine Kombination der Vorteile der Fuzzy-Set Theorie und der KNN beinhaltet die Neuro-Fuzzy-Theorie. Die Grundlagen dazu werden in [Kosk92; Nauc94; Sera94] vermittelt. Die KNN werden dazu genutzt, die Regelbasis des Fuzzy-Controllers zu ermitteln bzw. an die jeweils spezifisch herrschenden Prozeßbedingungen und Änderungen im Verlauf zu adaptieren. Die Modellierung nichtlinearer Systeme mit Neuro-Fuzzy wird in [Boss95] gezeigt. Ein großer Teil von Anwendungen repräsentieren Optimierungs- und Lernaufgaben [Hens95; Preu95]. Der Einsatz solcher Algorithmen zur Optimierung der Modellstrukturen anhand von Daten wird hier jedoch nicht weiter verfolgt.

1.2.3.3 Einsatz von Soft Computing Methoden in Beobachterstrukturen

Die Implementierung der Fuzzy-Set Theorie in Beobachterstrukturen wurde bisher im wesentlichen theoretisch untersucht. In [Berg96] wird ein modellbasierter Fuzzy-Beobachter für ein invertiertes Pendel vorgestellt. Eine Adaption der Verstärkungsmatrix wird in [Adja94] durchgeführt. Eine allgemeine Nutzung der Vorgehensweise für weitere Anwendungen ist nur bedingt möglich. [Wey99] zeigt ebenfalls eine Beobachterstruktur mit einer Fuzzy-Rückführung in Form von adaptierenden Normierungsvektoren. Damit wird eine Verbesserung des Regelverhaltens durch den kombinierten Fuzzy-Beobachter, bestehend aus analytischem Modell und Fuzzy-Rückführung, herbeigeführt. In [Simu92] wird ein fuzzy-unterstützter Erweiterter Kalman-Filter als Verfahren der analytische Redundanz vorgeschlagen, der für die on-line Zustandsschätzung und Vorhersage eines biologischen Prozesses genutzt wird. Im bereits genannten Beitrag von [Chen99] wird der entwickelte Fuzzy-Beobachter (auf der Grundlage eines Takagi-Sugeno Modells) zur Residuengenerierung bezogen auf eine Fehlererkennung in nichtlinearen Systemen genutzt. Ebenfalls eine Adaption der Verstärkungsmatrix mit Fuzzy-Mamdani-Modellen wird in [Käst98-1, 2] beschrieben. Dabei wird die Verstärkungsmatrix mit Hilfe des Fuzzy-Modells so dimensioniert, daß die bei der Dimensionierung zu lösenden Aufgabenstellungen, Filterung der stochastischen Meßsignalanteile und Konvergenz der berechneten und gemessenen Zustandsgrößen, optimal gelöst werden.

In Beobachterstrukturen werden auch KNN als Verfahren des Soft Computing zur Approximation von Modellen und Parametern genutzt. In [Bold94] wird ein KNN zur Approximation der partiellen Ableitungen der linearen Fehlerdifferentialgleichung eines linearen Multimodellentwurfs (erweiterte Linearisierung) eingesetzt. Zu entwerfen sind dabei ein großes Netz oder mehrere kleine, was den Aufwand ähnlich wie beim fuzzy-unterstützten Beobachter [Käst96] stark erhöht und die Übersichtlichkeit erschwert. In [Schä97] wird das KNN als universeller, nichtlinearer Approximator für ein Prozeßmodell verwendet, wobei eine statische Nichtlinearität in Zusammenhang mit einer Beobachterstruktur (Rückführung des Fehlers) erlernt wird. [Lenz98] zeigt die Anwendung von lernfähigen, neuronalen Beobachtern für eine Klasse nichtlinearer dynamischer Systeme mit (isolierten) statischen Nichtlinearitäten und die Nutzung für die intelligente Regelung von Ottomotoren. Eine weitere interessante praktische Anwendung der Kopplung eines KNN mit einem Beobachter zur dynamischen Identifikation von isolierten Nichtlinearitäten präsentiert [Schr00] für Walzwerke. Die Veröffentlichungen zu Beobachtern mit implementierten Fuzzy- oder Neuro-Strukturen verdeutlichen die Entwicklung hin zur Kombination der Methoden mit analytischen Komponenten.

1.2.4 Hybridverfahren

Der Trend der Anwendungen der Verfahren des Soft Computing zeigt sich beim signifikanten Einsatz in technischen Bereichen. Eine praktikable Lösung von Problemen ist zu erwarten, wenn neben den klassischen Methoden die neuen Verfahren gleichzeitig eingesetzt werden. Es ist eine sinnvolle Kombination von Verfahren erforderlich, die sich für die Lösung der Gesamtproblematik anbieten. Das bedeutet u. a. die Entwicklung von Hybridkonzepten und Hybridmodellen.

Die Verwendung der Bezeichnung ‚hybrid‘ erfolgt in der Literatur in unterschiedlichen Varianten zur Behandlung von Systemen mit der in der Technik gewöhnlich auftretenden Komplexität. In [Enge97; Rais95] werden dynamische Systeme mit Wechselwirkung ereignisdiskreter und kontinuierlicher Prozesse als hybrid beschrieben. In dieser Arbeit werden als Hybridverfahren solche bezeichnet, wo für die Repräsentation von Wissen verschiedene Formalismen zur Verfügung stehen [Popp92]. In dem Fall wird in diesen Verfahren analytisches Wissen in Form mathematischer Modelle mit Methoden des Soft Computing (FST, KNN) kombiniert [Boll97; Fens97-3; Fisc98; Hamp95-1, 96; Oliv99]. Unschärfen, die z. B. bei der Erfassung von Prozessen, bei statistischen Fehlern, Meßungenauigkeiten etc. auftreten, können durch eine fuzzy-basierte Beschreibung in Zusammenhang mit dem analytischen Anteil kompensiert werden. Über das analytische Modell sind Basisstrukturen vorhanden und Anhaltspunkte für Daten bekannt. Eine Aufgabe ist dabei die Sicherung der Beobachtbarkeit und Stabilität der Hybridentwürfe, die zunächst aus der Prozeßkenntnis abgeleitet werden können.

Ein dynamisches Fuzzy-Modell in Verbindung mit einem hybriden Neuro-Fuzzy-Fraktalen Ansatz zur adaptiven, modellgestützten Steuerung eines Flugzeuges wird in [Meli00] gezeigt. Die Basis sind Sugeno-Modelle mit einer weiterentwickelten Inferenzmethode, mit der als Ausgangsgröße die entsprechend in einem Bereich gültige Differentialgleichung (DGL) bestimmt werden kann. Die Ausgangsgröße wird dann aus der DGL mit numerischen Lösungsmethoden berechnet. Ein interessanter Aspekt ist die Ermittlung der fraktalen Dimension zur Charakterisierung der nichtlinearen Dynamik des Prozesses. Diese Anwendung ist mit einem hohen mathematischen Aufwand verbunden und die Differentialgleichungen müssen in allen Parameterbereichen und für die Teilprozesse bekannt sein.

Die Kombination von Verfahren, die auf verschiedenen mathematischen Formalismen beruhen, hat in der letzten Zeit erheblich zugenommen. Zur Modellierung von hybriden Strukturen wird in [Woll94] die Kombination von klassischen und wissensbasierten Ansätzen vorgeschlagen. Es wird ein nichtlinearer, struktumschaltender Arbeitspunktbeobachter mit Fuzzy-Entscheidungssystem entwickelt. Es sind allerdings keine Verifikation der Methodik und praktischen Anwendungen angegeben. Weitere Applikationen werden auf dem Gebiet der Datenanalyse bzw. der Prozeßmodellierung unter Nutzung verschiedener fuzzy-basierter und scharfer Algorithmen in [Jörn97; Krol97] vorgestellt.

Hybride Methoden zur Optimierung biotechnischer Produktionsprozesse mit dem Ziel der Regelung werden in [Oliv99] aufgezeigt. Hier wird festgestellt, daß die nicht alternative sondern simultane Verwendung von Prozeßinformationen dazu führt, die Zusammenhänge zwischen den beeinflussbaren Größen am betrachteten Prozeß und den Zielgrößen der Produktion genauer zu beschreiben. Dabei werden sogenannte White-Box Modelle (klassisch mathematische Modellierung) mit Gray-Box Modellen (Fuzzy-Systeme) und Black-Box Modellen (KNN) zu einem hybriden Prozeßmodell verknüpft [Oliv99]. Die Soft Computing Verfahren werden in erster Linie zur Optimierung existierender Prozesse eingesetzt. Herausgestellt wird, daß für praktische Anwendungen für jeden Teilaspekt der Modellierung die effiziente Darstellung verwendet werden muß. Das bedeutet die Erweiterung des in

klassischen Modellen vorhandenen Wissens mit zusätzlichen Informationen. Die Nutzung des Wissens über die gewünschte Zielfunktion des Prozesses und beeinflussbare Größen führt mit einer so ausgerichteten Modellierung zu einer Verbesserung der Produktivität.

Eine Anwendung eines Hybridverfahrens für eine enzymatische Penicillin-G Konversion unter der Kombination analytischer Differentialgleichungen und eines Fuzzy-Modells, das die unbekannt Beziehungen repräsentiert, wird in [Babu98] vorgestellt. Das nichtlineare Takagi-Sugeno Fuzzy-Modell wird über eine Identifikation hergestellt. In diesem Beitrag wird ebenfalls betont, daß sich für Systeme höherer Ordnung und mit hoher Dynamik derartige Hybridverfahren als besonders geeignet erweisen. Damit bestätigen diese Arbeiten die Sinnfälligkeit der Entwicklung und des Einsatzes von Hybridverfahren. Häufig ist die Modellierung mittels der beschriebenen Hybridverfahren durch einen hohen Aufwand beim Entwurf gekennzeichnet. In einigen Fällen bleiben die Methodik und die Kopplung unübersichtlich oder schwer nachvollziehbar und die Anwendung ist auf definierte und spezielle Systemklassen bzw. auf die Regelung von Prozessen beschränkt.

1.2.5 Druckbehältermodelle zur Beschreibung der Füllstandsmessung und Nachrechnungen mit dem ATHLET-Code

Nichtlineare, analytische Druckbehältermodelle zur Bestimmung von physikalischen Größen und Zustandsgrößen in Prozessen mit Zweiphasengemisch wurden von [Acke88; Clar82; Goem72; Jung88; Meis76; Naha70; Pras81; Proc89; Tyle82; Worl93] entwickelt. Bei [Goem72; Meis76; Proc89] steht die vollständige Modellierung eines Druckbehälters, z. B. Druckhalter und Dampferzeuger im Kernkraftwerk im Vordergrund. Diese Modelle sind zu umfangreich, um während des Betriebes zur Überwachung und zur Gewinnung von Meßinformationen zur Anwendung zu kommen. Eingesetzt werden sie zur Fehlererkennung für die Signalvalidierung [Proc89] bzw. zur Erkennung von Betriebsstörungen [Meis76].

Einfachere, besser handhabbare Modelle, wie [Pras81; Käst96; Worl93] sind zur Nachbildung plötzlicher Druckentlastung geeignet bzw. verifiziert worden. Das Programm BLDN ist zur Berechnung der axialen Dampfgehaltsverteilung und der Füllstandsverläufe in Druckgefäßen bei negativen Drucktransienten anwendbar [Pras95, 96]. Das Modell ist als nichtlineares Parallelmodell einsetzbar und verifiziert [Fens97-1]. In [Worl93] wurde ein klassisches Parallelmodell zur Bestimmung von nichtmeßbaren Zustandsgrößen (Dampfgehalt, Gemischfüllstand) entwickelt, welches in Zusammenhang mit einem fuzzy-unterstützten Korrektions- und Diagnosealgorithmus für die Fehlererkennung zur Anwendung kam [Hamp94-2].

Der ATHLET-Code als komplexer Simulationscode für thermohydraulische und thermodynamische Vorgänge in technischen Systemen [ATHL97] hat sich als ein zuverlässiges Werkzeug bei der Modellierung und Simulation von Prozessen, vor allem in Störfallsimulationen, bewährt [Hamp94-3]. Die Methode der Verifikation und der Nachweis, daß bei Nachrechnung mit dem ATHLET-Code die bei Experimenten an der Versuchsanlage Druckbehältermodell (DHM) gemessenen Werte richtig wiedergespiegelt werden, wurde in [Käst96] geführt. Auf dieser Basis werden die nichtmeßbaren Zustandsgrößen bereitgestellt,

um neu entwickelte Modellstrukturen zu testen und zu verifizieren. Die Anwendung des ATHLET-Code ist aufgrund der Komplexität als Parallelmodell nicht möglich.

1.3 Offene Probleme

Bisherige Arbeiten zu dem Thema modellgestützte Meßverfahren wurden auf der Basis linearer Modellansätze für einen Beobachter mit einem linearisierten Zustandsraummodell für einen Druckbehälter mit siedendem Wasser-Dampf Gemisch durchgeführt [Käst96]. Grundlage dafür bildete das von [Worl93] entworfene Parallelmodell auf der Basis von Ein- und Ausgangsgrößen für die Füllstandsmessung im Druckbehälter. Mit den verschiedenen untersuchten linearen Beobachtern [Käst96] wurde hinsichtlich der Rekonstruktionsgüte für die meßbare Zustandsgröße Füllstand (Nahbereich, Zone oberhalb der unteren Einbindung des Füllstandsmeßsystems) eine Übereinstimmung erreicht. Für die nichtmeßbare Zustandsgröße Füllstand (Nahbereich, Zone unterhalb der unteren Einbindung des Füllstandsmeßsystems) wurde mit den klassischen linearen Beobachtern im Arbeitspunkt eine hinreichende Rekonstruktionsgüte erreicht. Die Aussage gilt begrenzt für den gesamten Beobachtungszeitraum und bei Arbeitspunktänderungen. Gleichzeitig treten Einschränkungen dieses Beobachters hinsichtlich des Gültigkeitsbereiches durch den Einfluß von Nichtlinearitäten wie dem Wärmestrom bei negativen Drucktransienten auf.

In [Stie95] wird ein rein wissenschaftliches Modell eines linearen Beobachters auf der Basis der Fuzzy-Set Theorie für diesen Beispielprozeß entwickelt. Im Ergebnis dessen wurde die Sinnfälligkeit der Verwendung von Fuzzy-Algorithmen unterstrichen und die Modellierung von nichtlinearen, dynamischen Prozessen mit Verfahren des Soft Computing als möglicher Weg aufgezeigt. Die Dimensionierung der Fuzzy-Modelle wird beim Entwurf dem physikalischen Prozeß mit den Eingangs- und Ausgangsgrößen auf der Basis des linearisierten Zustandsraummodells angepaßt.

Als Weiterentwicklung des klassischen linearen PI-Beobachters wird in [Hamp96; Käst96; Wagn95] ein fuzzy-unterstützter Beobachter als modellgestütztes Meßverfahren entworfen. Es werden die Modellmatrizen für das Beispiel hydrostatische Füllstandsmessung im Arbeitspunkt mittels einer Fuzzy-Menge approximiert, um die Nichtlinearitäten des Prozesses zu beschreiben bzw. zu kompensieren. Als Basis wird ein linearer Multimodellansatz in ausgewählten Arbeitspunkten genutzt.

Durch die Adaption entsteht ein quasi nichtlineares Modell. Ein unbekannter nichtlinearer Verlauf der dynamischen Eingangsgröße Wärmestrom Wand \Leftrightarrow Wasser-Dampf Gemisch wird in der Steuermatrix in jedem angenommenen Arbeitspunkt durch Vorausrechnungen mit dem ATHLET-Code vorgegeben und damit als bekannt vorausgesetzt. Das bedeutet die fuzzy-basierte Adaption einer modifizierten Steuermatrix zur Kompensation der nichtlinearen Prozeßstörung als nichtmeßbare Eingangsgröße unter hohem Aufwand. Offen bleibt die Frage nach einer physikalisch interpretierbaren, geeigneten Modellierung der Größe Wärmestrom im gesamten Parameterbereich der Anlage.

Die Dimensionierung der Rückführung des PI-Beobachters beinhaltet eine lineare Fehlerdifferentialgleichung mit konstanten Koeffizienten. In Folge der Fuzzy-Adaption wird eine verbesserte Rekonstruktionsgüte gegenüber dem klassischen linearen Beobachter erreicht. Nachteilig ist, daß für jedes Element der Matrix des linearisierten Zustandsraummodells ein Fuzzy-Modell entworfen werden muß, was den Aufwand besonders im höherdimensionalen Raum erheblich erhöht. Die notwendigen Simulationen und Entwicklungen wurden mit dem Simulationsprogramm DynStar [DynS00] mit Fuzzy-Shell durchgeführt.

Der fuzzy-unterstützte Beobachter wurde nur für wenige Beispielexperimente berechnet und getestet. Damit wurde die Sinnfälligkeit des Einsatzes von Methoden des Soft Computing für die Modellierung mit modellgestützten Meßverfahren nachgewiesen, aber bei Meßbereichsüber- und -unterschreitungen verliert der Beobachter aufgrund der Beobachterphilosophie, d. h. der Kompensation von bestimmten Modellungenauigkeiten und –unsicherheiten über die Rückkopplung des Fehlers, seine Gültigkeit. Es hat sich gezeigt, daß die Rekonstruktionsgüte des Beobachters zu erhöhen ist und der Nachweis der Funktionsfähigkeit für alle Experimente im technologischen Parameterbereich der Versuchsanlage als Beispielprozeß zu führen ist.

Unter Berücksichtigung des Standes der Technik bleiben folgende offene Problemstellungen:

- ⇒ Anwendung eines Parallelmodells/Beobachters mit nichtlinearem Modellterm für die Beschreibung der Füllstandsdynamik (verbesserte Widerspiegelung des Prozesses bei großen Abweichungen vom Arbeitspunkt),
- ⇒ Sicherung der Beobachtbarkeit des nichtlinearen Parallelmodells,
- ⇒ Entwurf eines nichtlinearen klassischen Beobachters mit Gültigkeit im technologischen Parameterbereich der Anlage,
- ⇒ Geeignete Beschreibung von Unschärfen mittels Fuzzy-Set Theorie im nichtlinearen Modell,
- ⇒ Verringerung der notwendigen Anzahl von Fuzzy-Modellen bei dem Beobachterentwurf unter Beschränkung auf die zu adaptierende Größe Wärmestrom,
- ⇒ Analyse und Entwicklung der Struktur von Fuzzy-Modellen für dynamische Größen,
- ⇒ Bereitstellung einer zuverlässigen Prozeßinformation bei Meßbereichsüber- und unterschreitungen oder Meßsystemausfall mit qualitativ hoher Rekonstruktionsgüte,
- ⇒ Test und Verifikation der Verfahren und Methoden (Gewährleistung der Funktionalität und Robustheit) im technologischen Parameterbereich der Anlage,
- ⇒ Gewährleistung einer kontinuierlichen Prozeßbeobachtung bei betriebsbedingten und störfallbedingten Übergangsvorgängen und Transienten.

1.4 Zielstellung und Gliederung der Arbeit

1.4.1 Gesamtzielstellung

Die globale Zielsetzung ist die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Modellierung des Füllstandes im Druckbehälter mit siedendem Wasser-Dampf Gemisch bei negativen Drucktransienten unter Nutzung der Methoden der analytischen Redundanz (modellgestützte Meßverfahren). Das Gesamtziel ist die Realisierung einer kontinuierlichen Prozeßbeobachtung (on-line) für Anwendungen in der Anlagenüberwachung. Aus den offenen Aufgabenstellungen ergeben sich die Einzelzielsetzungen für die Arbeit.

1.4.2 Einzelzielsetzungen

1. Bereitstellung eines Konzepts zur Prozeßüberwachung unter Entwicklung verschiedener Modelltypen und Redundanzen zur Generierung des neuen Verfahrens,
2. Bestimmung nichtmeßbarer Zustandsgrößen in nichtlinearen Systemen mit nichtlinearen Parallelmodellen/Beobachtern, wie des Gemischfüllstandes, mit dem neuen Verfahren,
3. Zielprozeß ist die Modellierung des Füllstandes bei negativen Drucktransienten in Druckbehältern mit siedendem Wasser-Dampf Gemisch mittels neuartiger modellgestützter Meßverfahren,
4. Definition eines Fuzzy-Modells für dynamische Zustandsgrößen zur Modellierung der Füllstandsdynamik,
5. Erstellung des nichtlinearen Parallelmodells als erstes modellgestütztes Meßverfahren,
6. Entwurf eines neuen hybriden Beobachters (zweites modellgestütztes Meßverfahren) mittels Kombination von klassischen analytischen Verfahren, Methoden und Komponenten der Fuzzy-Set Theorie, die den Einfluß von Zustandsgrößen, wie den prozeßspezifischen Wärmestrom, kompensieren,
7. Entwicklung von neuen fuzzy-basierten Parallelmodellen (drittes modellgestütztes Meßverfahren) zur Bereitstellung von Prozeßinformationen unabhängig von Meßbereichsüber- oder -unterschreitungen oder Ausfällen,
8. Generierung von Rechnerprogrammen mittels dem Softwaretool DynStar, welches die besonderen Anforderungen zur Umsetzung der Modelle und der kontinuierlichen Prozeßüberwachung erfüllt,
9. Test und Verifikation der neuen Verfahren anhand der erstellten Datenbasis und dem vorhandenen Prozeßwissens (Experimente an der Druckbehälterversuchsanlage DHM, Simulationsrechnungen mit dem ATHLET-Code).

1.4.3 Gliederung

Die genannten Einzelzielsetzungen sind die Grundlagen für die folgenden Kapitel (Gliederung) der Arbeit.

Nichtlineare Modelle für modellgestützte Meßverfahren (Kapitel 2)

Der Gegenstand des Kapitels 2 ist die Analyse von nichtlinearen Modellen für modellgestützte Meßverfahren zur Bestimmung der nichtmeßbaren Zustandsgrößen im Druckbehälter. Als erstes ist das die Beschreibung von Modellen mit und ohne Rückkopplung (modellgestützte Meßverfahren in Form von Parallelmodell und nichtlinearem Beobachter in Abschnitt 2.1). Weiterhin wird die mathematische Modellbildung hinsichtlich Modell- und Parameteradaption mit Soft Computing Methoden (Fuzzy-Set Theorie und KNN) untersucht (Abschnitt 2.2). Dabei wird die Methode beim Einsatz der Fuzzy-Set Theorie für dynamische Prozesse erörtert. Im Abschnitt 2.2.2 wird ein Fuzzy-Modell mit externer Dynamik entwickelt und der Einsatz für transiente, zeitrelevante Prozesse diskutiert. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit des Fuzzy-Modells mit externer Dynamik wird anhand eines PT1-Gliedes geführt. Die Kombination von analytischen Verfahren und Verfahren des Soft Computing führt zur hybriden Modellierung, die in Abschnitt 2.3 erläutert wird.

Generierung der Daten- und Wissensbasis, Prozeßspezifik, Nichtlineares Modell für die Modellierung des Füllstandes im Druckbehälter mit siedendem Zwei-Phasen Gemisch, Zustandsrekonstruktion mit dem nichtlinearen Parallelmodell (Kapitel 3)

Da die neuen Methoden und Verfahren prozeßspezifisch auf das Beispiel angewendet werden, ist die Beschreibung des Untersuchungsgegenstandes notwendig. Es wird eine Klassifikation der Nichtlinearitäten und der Unschärfen des Prozesses vorgenommen. Der Modellierung des Druckbehälters liegen die Anlagenverhältnisse der Druckbehälterversuchsanlage (DHM) zugrunde. Die Datenbasis für Simulation und Modellierung bilden Experimente an der Druckbehälterversuchsanlage und deren Nachrechnung mit dem ATHLET-Code (Abschnitt 3.1). Die Nachrechnungen und Simulationen mittels des ATHLET-Codes und die damit bereitgestellten Daten nichtmeßbarer Zustandsgrößen sind die Grundlage für den off-line Test der entwickelten fortgeschrittenen Methoden. Ausgangspunkt für den Beobachterentwurf sind die nichtlinearen Modellgleichungen nach [Käst96] in Abschnitt 3.2. Die nichtlinearen Modellgleichungen werden als Parallelmodell zur Zustandsrekonstruktion eingesetzt und bewertet.

Bestimmung des Füllstandes mit nichtlinearen Beobachtern (Kapitel 4)

In Übertragung der Erfahrungen mit den linearisierten (linearen) Modellen auf den nichtlinearen Fall sowie zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit wird in Abschnitt 4.1 ein klassischer nichtlinearer PI-Arbeitspunkt-Beobachter entworfen. Mit der Berechnung der Nichtlinearen Beobachtbarkeitsnormalform (NBKNF, [Kell86-1]) des Nichtlinearen Normalformbeobachters wird die Beobachtbarkeit des nichtlinearen Modells gesichert. Um das Problem der zu beschreibenden Nichtlinearität in Form des Wärmestromes $\text{Wand} \Rightarrow \text{Wasser-Dampf Gemisch}$ zu lösen, wird ein neuer hybrider nichtlinearer PI-Arbeitspunkt-Beobachter entwickelt, der ein Fuzzy-Modell mit externer Dynamik des Wärmestroms beinhaltet (Abschnitt 4.2). Dazu gehören die Analyse der Struktur des integrierten Fuzzy-Modells, eine

Definition der linguistischen Variablen und eine Ermittlung der prozeßspezifisch dominanten und nichtdominanten Eingangsgrößen sowie eine Darstellung der Ergebnisse der Zustandsrekonstruktion.

Neue fuzzy-basierte Parallelmodelle zur Bereitstellung von Prozeßinformationen unabhängig von Meßbereichsüber- oder -unterschreitungen (Kapitel 5)

Beobachter sind in ihrer Gültigkeit hinsichtlich Meßbereichsüber- und -unterschreitungen und Ausfällen von Meßsystemen sowie Füllstandsmeßabweichungen eingeschränkt (Abschnitt 5.1). In solchen Fällen muß eine redundante, zuverlässige und robuste Prozeßinformation bereitgestellt werden, die unabhängig davon ist (Abschnitt 5.2: Definition der Ein- und Ausgangsgrößen). Dazu werden fuzzy-basierte Parallelmodelle für den Massenfüllstand (Nahbereich) (Abschnitt 5.3) und den Gemischfüllstand (Abschnitt 5.4) auf der Basis von zuverlässigen Meßgrößen wie dem Massenfüllstand (Weitbereich) entworfen.

Konzept zur Prozeßüberwachung (Kapitel 6)

Unter Zusammenstellung der neu entwickelten Modellredundanzen auf der Basis der modellgestützten Meßverfahren wird in Kapitel 6 ein Konzept zur kontinuierlichen Prozeßbeobachtung mittels fuzzy-basierter Modellumschaltung am Beispiel der Modellierung des Füllstandes bei negativen Drucktransienten entworfen.

Das Kapitel 7 enthält die Zusammenfassung und abschließende Wertung sowie Schlußfolgerungen für weiterführende Arbeiten.

2 Nichtlineare Modelle für modellgestützte Meßverfahren

Zur Lösung der Aufgabenstellung ist es notwendig, nichtlineare Modelle für modellgestützte Meßverfahren (MMV) zur Bestimmung nichtmeßbarer Zustandsgrößen hinsichtlich ihres Einsatzes im Rahmen der Arbeit zu analysieren und zu beschreiben. Zu den Möglichkeiten der Modellierung nichtlinearer Prozesse gehören die klassischen analytischen Verfahren, wie nichtlineare Beobachter, sowie die Verfahren des Soft Computing (Fuzzy-Set Theorie, KNN [Bezd94]). Dem Prozeß wird ein mathematisches Modell auf der Basis der meßbaren Zustandsgrößen zur Rekonstruktion der nichtmeßbaren Zustandsgrößen parallel geschaltet.

2.1 Klassische nichtlineare modellgestützte Meßverfahren

Beim Entwurf der modellgestützten Meßverfahren ist für jedes zu beobachtende System eine nichtlineare Beobachtungsaufgabe in Form der Zustandsgleichungen mit dem Anfangswert $\underline{x}(t_0) = \underline{x}_0$ zu formulieren [Fens97-1]:

$$\dot{\underline{x}}(t) = f(\underline{u}(t), \underline{x}(t), t) \quad (\text{nichtlineare, zeitvariante Zustandsdifferentialgleichung}) \quad (2.1)$$

$$\underline{y}(t) = h(\underline{u}(t), \underline{x}(t), t) \quad (\text{nichtlineare, zeitvariante Meßgleichung}) \quad (2.2)$$

Die Lösung der Beobachtungsaufgabe beinhaltet:

- ⇒ die Erfassung der meßbaren Ein- und Ausgangsgrößen des Prozesses,
- ⇒ die Kenntnis des physikalischen Prozeßmodells,
- ⇒ eine Darstellung der Gleichungen im Zustandsraum mit meßbaren und nichtmeßbaren Zustandsgrößen,
- ⇒ die Gewährleistung der Beobachtbarkeit im Zustandsraum,
- ⇒ den Entwurf des Beobachters mit der Rückführung des Fehlers,
- ⇒ die Analyse der Stabilität im betrachteten Gebiet.

Es ist sinnvoll, die Ausgangsgröße der Gleichungen (Meßgröße) durch eine meßbare Zustandsgröße in den Zustandsdifferentialgleichungen zu ersetzen. Dadurch vereinfacht sich der Beobachterentwurf.

Bei Widerspiegelung des realen Prozesses durch das modellgestützte Meßverfahren (Bild 2-1) wird aus der Übereinstimmung der Ausgangsgrößen von Modell und Prozeß auf die Übereinstimmung von nichtmeßbaren Zustandsgrößen geschlossen. Ursachen für auftretende Abweichungen zwischen den Ausgangsgrößen von Prozeß und modellgestütztem Meßverfahren (Nichtkonvergenz) können sein:

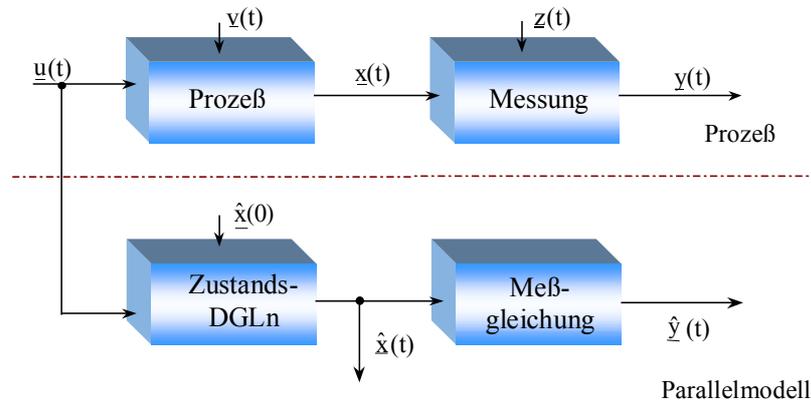
- ⇒ ungenau bekannte Startbedingungen ($x_0 \neq \hat{x}_0$),
- ⇒ Modellunsicherheit und -ungenauigkeit, Nichtberücksichtigung von Nichtlinearitäten,
- ⇒ Störeinflüsse auf den Prozeß und das Meßsystem,
- ⇒ Fehlfunktionen von Systemen.

Die Prozeßbeobachtung kann in zwei Varianten der Zustandsrekonstruktion realisiert werden:

1. Parallelmodell ohne Rückführung,
2. Beobachter mit Rückführung.

2.1.1 Modelle ohne Rückkopplung (Parallelmodell)

Für die Beschreibung nichtlinearer Systeme mittels Parallelmodellen werden die Zustandsgleichungen ohne Rückführung des Fehlers zugrunde gelegt. In Bild 2-1 wird eine Darstellung eines MMV als Parallelmodell ohne Rückkopplung gegeben, die die Struktur von Prozeß, Modell und deren Einflußgrößen widerspiegelt. Es ist nur teilweise eine Kompensation von Modellfehlern und Prozeßstörungen möglich.



Variablen des Prozesses

- $\underline{u}(t)$ - Eingangsgrößen
- $\underline{x}(t)$ - Zustandsgrößen
- $\underline{y}(t)$ - Ausgangsgrößen
- $\underline{v}(t)$ - deterministische Störungen
- $\underline{z}(t)$ - stochastische Störungen

Variablen des Parallelmodells

- $\hat{\underline{x}}(t)$ - rekonstruierte Zustandsgrößen
- $\hat{\underline{y}}(t)$ - rekonstruierte Ausgangsgrößen

Bild 2-1: Struktur von Prozeß und MMV als Parallelmodell

Um eine verwertbare Aussage über meßbare und nichtmeßbare Zustandsgrößen zu erhalten, wird innerhalb der Arbeit das Parallelmodell zur Zustandsrekonstruktion eingesetzt, wenn der klassische Beobachter mit Rückführung seine Gültigkeit verliert. Dies tritt im Fall von Meßbereichsüber- und -unterschreitungen eines hydrostatischen Füllstandsmeßsystems durch den Massenfüllstand (Nahbereich) oder den Gemischfüllstand und bei Meßsystemausfall (Nahbereich) auf.

2.1.2 Modelle mit Rückkopplung (Nichtlineare Beobachter)

Der Unterschied zwischen Beobachter und klassischem Parallelmodell besteht darin, daß beim Beobachtermodell der Rekonstruktionsfehler über einen Korrekturterm mittels der sogenannten Verstärkungsmatrix rückgekoppelt wird. Die Verstärkungsmatrix ist prozeßspezifisch zu dimensionieren. Der Korrekturterm sorgt für die Konvergenz zwischen Modell und Prozeß. Die Differenz zwischen gemessenem und berechnetem Wert der Ausgangsgrößen von Prozeß und Modell ist der Rekonstruktionsfehler \tilde{y} .

$$\tilde{y}(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (2.3)$$

Dieser ist so schnell als möglich durch den Beobachter zu kompensieren (Konvergenzzeit). Für den Entwurf des Beobachters ist ein Kompromiß zu finden zwischen folgenden Aufgabenstellungen [Käst98-2]:

- ⇒ Konvergenz des Rekonstruktionsfehlers (bleibende Abweichung) und
- ⇒ Filterung (stochastischer Signalanteil der Meßgröße).

Der nichtlineare klassische Beobachter besteht grundsätzlich aus dem nichtlinearen Streckenmodell und einem additiven Korrekturterm K für die Rückführung des Rekonstruktionsfehlers [Fens97-1; Föll89; Zeit79, 84]. Der Korrekturterm hat eine nichtlineare oder eine lineare Struktur, und besitzt einen proportional und/oder integralen Anteil. Die zeitvarianten Beobachtergleichungen lauten:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= f[\hat{x}(t), u(t), t] + K[\hat{x}(t), u(t), t] \\ \hat{y}(t) &= h[\hat{x}(t), u(t), t] \\ \text{mit } \hat{x}(t_0) &= \hat{x}_0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Die Fehlerdifferentialgleichung ist nicht immer homogen wie im linearen Fall:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \quad \text{mit } \tilde{x}(t) = f[x(t), u, \hat{x}(t)] \quad (2.5)$$

Wenn der Entwurf nicht auf eine lineare oder linearisierte Fehlerdifferentialgleichung führt, ist die Verstärkung der Rückführung von Eingangsgrößen und Zustandsgrößen abhängig und nichtlinear zu dimensionieren. Das Bild 2-2 zeigt die allgemeine Struktur eines klassischen nichtlinearen, zeitvarianten Beobachters.

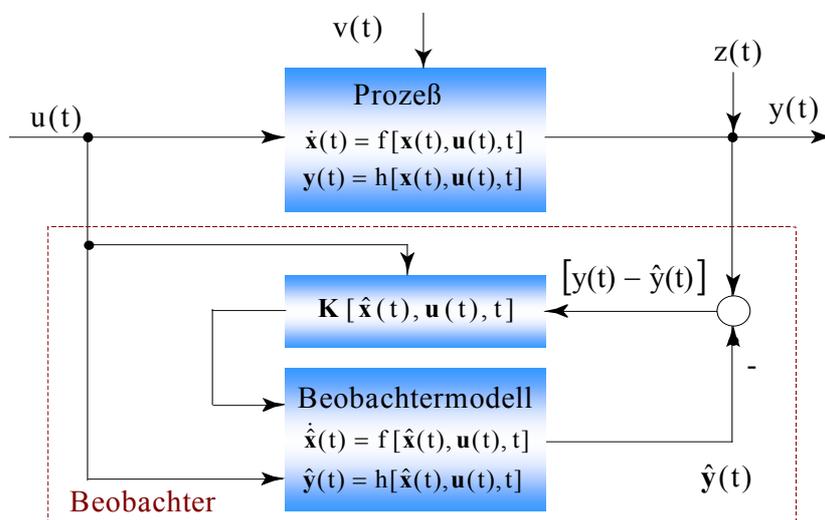


Bild 2-2: Struktur des klassischen nichtlinearen Beobachters [Fens97-3]

Die Qualität und Gültigkeit dieser Beobachter sind limitiert durch [Fens97-1]:

- ⇒ statische Nichtlinearitäten des Prozesses und damit des Prozeßmodells,
- ⇒ dynamische Nichtlinearitäten (Prozeßstörungen, Änderung der Betriebsbedingungen),
- ⇒ Ausfall oder Fehlfunktionen von Meßsystemen und fehlerbehaftete Meßgrößen,
- ⇒ beschränkte Anwendbarkeit auf bestimmte Klassen von Systemen.

2.2 Modellbildung mit Verfahren des Soft Computing

Neben den klassischen, analytischen Verfahren ist der Einsatz der Methoden und Verfahren des Soft Computing zur Modellbildung für modellgestützte Meßverfahren zur Bestimmung der nichtmeßbaren Größen möglich. Die Grundidee des Einsatzes beider Methoden besteht darin, den Nachteil des begrenzten Gültigkeitsbereiches der klassischen nichtlinearen modellgestützten Meßverfahren aufgrund der vorhandenen Nichtlinearitäten zu kompensieren. Für die Erstellung eines nichtlinearen Modells mit den Verfahren des Soft Computing sind zwei Vorgehensweisen möglich:

1. Modelladaption,
2. Parameteradaption.

Modelladaption heißt die Anpassung der Modellstruktur mittels Fuzzy-Set Theorie oder der KNN ohne genaue Kenntnis des physikalischen Modells auf der Grundlage der Prozeßidentifikation. A-priori Kenntnisse über den physikalischen Prozeß sind von hohem Nutzen, da damit eindeutige physikalische Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen für das Modell festlegbar sind. Der Parameteradaption liegt eine bekannte, in der Regel begründete physikalische Modellstruktur zugrunde, deren Parameter an die sich ändernden Rand- und Umgebungsbedingungen des Prozesses angepaßt werden.

Der Vorteil der Verwendung von Fuzzy-Set Theorie und KNN besteht darin, daß eine universelle nichtlineare Übertragungsfunktion mit beliebig vielen Ein- und Ausgangsgrößen einfach abgebildet werden kann. Da die Füllstandsdynamik im Druckbehälter beschrieben wird, sind Analysen zur Dynamisierung von Fuzzy- und KNN-Algorithmen erforderlich. Im folgenden werden die Anwendung der KNN, der Fuzzy-Set Theorie und die Dynamisierung der Strukturen beschrieben. Desweiteren wird die hier verwendete Form der hybriden Modellierung aus der Kombination eines analytischen und eines Fuzzy-Modells definiert.

Bei den Untersuchungen zur Dynamisierung von Soft Computing Algorithmen wurde hier der Einsatz von rekurrenten KNN (rekurrentes Netzwerk = modifiziertes Fehlerrückführungsnetz mit Rückkopplung und zeitrelevanter Komponente) als universeller Approximator für die Parameter- und Modelladaption untersucht. Dazu wurde ein Multilayer Perzeptron (MLP) mit externer Dynamik unter Verwendung der Fehlerrückführungsregel als Lernverfahren entwickelt und analysiert. Die Implementierung und der Test erfolgten mit einer eigens dafür entwickelten Software NETTOOL [Dra198] unter dem Programmsystem DynStar [DynS00]. In dem Softwarewerkzeug sind verschiedene Netzwerkarchitekturen mit Optionen für Aktivierung, Gewichte, Lernalgorithmus und Rückführung menügesteuert generierbar. Die Implementierung, Handhabung und die erzielten Simulationsergebnisse für das entwickelte KNN sind in der Dokumentation [Dra198] mit den jeweils gewählten Optionen für das Beispiel Füllstandsmessung im Druckbehälter dargestellt.

Dabei zeigte sich, daß KNN in Form von MLP grundsätzlich für eine solche Aufgabenstellung anwendbar sind. Es wurde nachgewiesen, daß bereits relativ einfache dynamische Netzwerkarchitekturen mit ein bis zwei verdeckten Schichten zur Beschreibung der nichtlinearen Modelle für den Wärmestrom und den Füllstand hinreichend sind. Die bisherige

Einschränkung ist gegeben durch den hohen Entwicklungsaufwand hinsichtlich der Freiheitsgrade bei der Erstellung eines KNN (Netzwerkarchitektur und verwendetes Lernverfahren) sowie durch zu hohe Fehlerwerte bei der Simulation. Die vorhandenen Datensätze auf der Basis der durchgeführten Experimente reichten nicht aus, um eine ausreichend gute Wiedergabe des realen Prozesses mit hoher Genauigkeit in der Arbeitsphase zu garantieren. Damit ist festzustellen, daß im speziellen Prozeßbeispiel Druckbehälter eine prinzipielle Anwendbarkeit von KNN in MMV vorliegt, aber schlechtere Ergebnisse als mit den Fuzzy-Modellen erreicht wurden [Dra198].

Für die Modellierung des nichtlinearen Prozesses Füllstand im Druckbehälter mit siedendem Zweiphasengemisch erfolgt deshalb eine Beschränkung auf den Einsatz der Fuzzy-Set Theorie sowie die hybride Modellierung.

2.2.1 Grundlagen und Methodik der Fuzzy-Modellbildung

Fuzzy-Modelle besitzen die Eigenschaft, universelle Übertragungsfunktionen mit beliebig vielen Ein- und Ausgangsgrößen zu approximieren. Überwiegend wurde diese Möglichkeit in der Regelungstechnik genutzt und der Begriff Fuzzy-Controller eingeführt. In der Arbeit wird die Fuzzy-Set Theorie zur Abbildung nichtlinearer Prozesse genutzt und deshalb der Begriff Fuzzy-Modell verwendet, um die Abgrenzung zum Einsatz bei der Regelung von Prozessen zu verdeutlichen. Im Weiterführenden wird jeglicher mathematischer Formalismus zur Abarbeitung von regelbasierten Fuzzy-Algorithmen „Fuzzy-Modell“ genannt.

Die Fuzzy-Set Theorie beruht auf einer unscharfen Logik und Mengenlehre, deren mathematische Beschreibung mit linguistischen Variablen erfolgt. Das bedeutet die Umsetzung eines in der Umgangssprache zu formulierenden physikalischen Sachverhaltes in einen mathematischen Formalismus. Der Zusammenhang zwischen den linguistischen Variablen wird mit Hilfe der Regelbasis beschrieben. Bei der Fuzzy-Set Theorie sind in Erweiterung zur klassischen Mengenlehre auch Zugehörigkeitswerte zwischen 0 und 1 zulässig.

Ein Fuzzy-Modell ist ein deterministischer, nichtlinearer, zeitinvarianter, regelbasierter, mathematischer Algorithmus, der es gestattet, den nichtlinearen statischen Zusammenhang zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen des Prozesses abzubilden. Die Zeitinvarianz des mathematischen Algorithmus bedeutet, daß das Fuzzy-Modell selbst kein dynamisches Eigenverhalten hat. Eine ausführliche Darstellung der Entwicklung und des grundlegenden Inhalts der Fuzzy-Set Theorie wird in der einschlägigen Fachliteratur geliefert [Drec96; Hell96; Kien97; Trae93; vAlt93; Zimm91].

Für die Generierung und Simulation der Fuzzy-Modelle, im folgenden kurz dargestellt, wird in der Arbeit die Fuzzy-Shell des Programmsystems DynStar [DynS00] mit den vorhandenen Freiheitsgraden verwendet. Für die Entwicklung eines Fuzzy-Modells sind die folgenden Entwurfsschritte notwendig, wie es in Bild 2-3 gezeigt wird:

- ⇒ Wahl der linguistischen Variablen (Fuzzifizierung),
- ⇒ Festlegung der Wertebereiche für Eingangs- und Ausgangsgrößen,

- ⇒ Bestimmung der Zugehörigkeitsfunktionen (linguistische Terme),
- ⇒ Aufstellen der Regelbasis und Wahl der Inferenzmethode,
- ⇒ Wahl der Defuzzifizierungsmethode,
- ⇒ Simulation,
- ⇒ Optimierung des gewünschten Verhaltens anhand der Regelbasis am Modell bzw. am Prozeß.

Innerhalb der Schritte bestehen für den Entwurf des Fuzzy-Modells und die Optimierung des Übertragungsverhaltens zahlreiche Freiheitsgrade (Fuzzy-Kenngrößen) [Hamp99-1]:

- ⇒ Fuzzifizierung:
 - Typ der Zugehörigkeitsfunktion (ZGF),
 - Zahl und Verteilung der Repräsentanten der Zugehörigkeitsfunktionen,
 - Spreizung und Überlappungsgrad,
- ⇒ Inferenz: Typ der Operatoren,
- ⇒ Defuzzifizierung: Methode der Defuzzifizierung.

Die Nutzung der Freiheitsgrade und die Anzahl der linguistischen Ein- und Ausgangsgrößen wird durch die Prozeßspezifik und die gewünschte Prozeßinformation bestimmt. Notwendig ist eine Festlegung von dominanten und nichtdominanten Eingangsgrößen für das Fuzzy-Modell [Chak98]. Mit den dominanten Eingangsgrößen wird die Grundstruktur des Fuzzy-Kennfeldes festgelegt. Mit den nichtdominanten Größen wird die Adaption entsprechend der Betriebs- und Anlagenbedingungen vorgenommen.

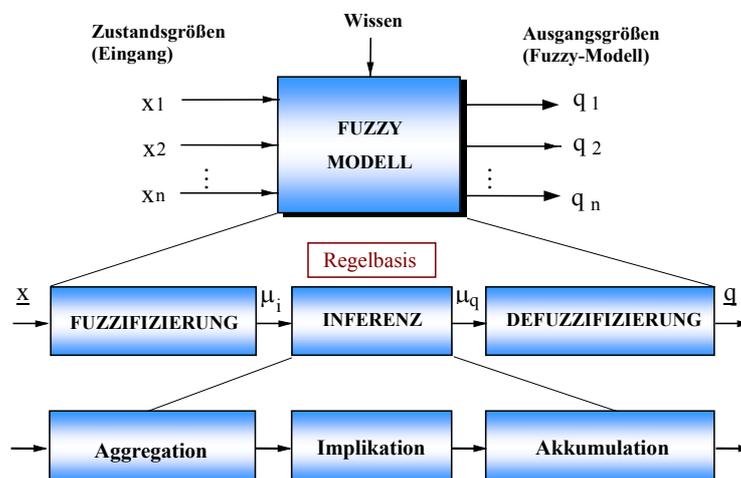


Bild 2-3: Grundstruktur und Freiheitsgrade des Entwurfs eines Fuzzy-Modells [Hamp99-1]

Den definierten linguistischen Variablen werden innerhalb eines Wertebereiches eine Anzahl von Zugehörigkeitsfunktionen (linguistische Terme) zugeordnet, die jeweils durch eine bestimmte Zugehörigkeitsfunktion gekennzeichnet sind. Für die meisten technischen Anwendungen sind stückweise lineare Zugehörigkeitsfunktionen wie lambda- und trapezförmige Funktionen ausreichend. Es hat sich gezeigt, daß komplexe Nichtlinearitäten auch mit einer geringeren Anzahl von Zugehörigkeitsfunktionen hinreichend genau beschreibbar

sind. Mit dem prozentualen Grad der Überlappung werden die Interpolationseigenschaften zwischen den Repräsentanten definiert.

Mit der Erstellung der Regelbasis wird der Zusammenhang zwischen der linguistischen Beschreibung der Eingangsgrößen (Bedingung) und der linguistischen Beschreibung der Ausgangsgrößen (Schlußfolgerung) dargestellt. Die dazugehörige Basisregel stellt den allgemeinen Zusammenhang zwischen Bedingungen und Schlußfolgerungen anhand der Prozeßspezifik her [Band93; Bert94; Kien93; Stei96; Zade65, 68]:

Basisregel: WENN [Bedingungen] DANN [Schlußfolgerungen]

Die Erstellung der Fuzzy-Algorithmen wird regelbasiert auf der Grundlage von Datensätzen, Erfahrungs- und Prozeßwissen ausgeführt (Bild 2-4). Festgelegten Eingangswertkombinationen werden bestimmte Ausgangswertkombinationen zugeordnet - Mamdani Modell [Kien97] -, welches hier ausschließlich Anwendung findet. Die Regelbasis ist einfach erweiterbar, modifizierbar und transparent.

Die Verknüpfung der Zugehörigkeitsfunktionen innerhalb der Regelbasis erfolgt mittels einer Inferenzmethode über Operatoren in Analogie zur klassischen Mengenlehre. Die Fuzzy-Operatoren dienen der Verknüpfung unscharfer Mengen zu einer Ergebnismenge, die ebenfalls unscharf ist. Folgende Grundtypen werden unterschieden [Bert94; Kien93]:

⇒ T-Norm (Durchschnittsoperator),

⇒ S-Norm (Vereinigungsoperator).

Die Berechnung der scharfen Ausgangswerte aus den in der Inferenz ermittelten linguistischen Schlußfolgerungen wird als Defuzzifizierung bezeichnet. Im Ergebnis der drei Bearbeitungsschritte Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung entsteht das Kennfeld. Dieses stellt den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen dar [Chak96; Hamp99-1; Kien93; Sche98-1, 2, 3].

Mit der Anzahl der Regeln werden die Stützstellen des zu generierenden Fuzzy-Kennfeldes definiert. Mit der Verteilung der Repräsentanten der Zugehörigkeitsfunktionen ist es möglich, das Kennfeld prozeßspezifisch zu deformieren [Hase96]. In der Tabelle 2-1 sind die in DynStar implementierten Auswahlmöglichkeiten für die Zugehörigkeitsfunktionen, die verwendeten Operatoren und die Defuzzifizierungsmethoden aufgelistet.

Tabelle 2-1: Freiheitsgrade für die Parametrierung von Fuzzy-Modellen in DynStar

Zugehörigkeitsfunktionen	UND-Verknüpfungen T-Normen	ODER-Verknüpfungen S-Normen	Methoden der Defuzzifizierung
lambda	Minimum (T1)	Maximum (S1)	Schwerpunkt-Methode
quadratisch	Algebraisches Produkt (T2)	Algebraische Summe (S2)	Singleton
exponentiell	Begrenztes Produkt (T3)	Begrenzte Summe (S3)	Maximum-Methode
glockenförmig			Maximum-Mittelwert-Methode
quadratisch exponentiell			
cosinus			

Im Ergebnis von umfangreichen Voruntersuchungen [Chak96; Hamp99-1; Sche98-2] zum Einfluß der Freiheitsgrade bei der Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung wurden für die entworfenen Verfahren und Methoden folgende Fuzzy-Kenngrößen genutzt. Die gewählten Kenngrößen haben sich bei der Generierung der Fuzzy-Modelle als effizient erwiesen und für die untersuchte Klasse von nichtlinearen Prozessen bewährt:

- ⇒ **Zugehörigkeitsfunktion:** lambda (gegebenenfalls Trapez)
- ⇒ **Überlappung:** 100%
- ⇒ **T-Norm:** Algebraisches Produkt (T2)
- ⇒ **S-Norm:** Algebraische Summe (S2)
- ⇒ **Defuzzifizierungsmethode:** Singleton

In Bild 2-4 ist beispielhaft die Methodik der Fuzzy-Modellierung dargestellt, wie sie in der vorliegenden Arbeit verwendet wurde. Dies beinhaltet die Experimente an der Versuchsanlage zur Gewinnung von Meßdaten, aus denen mittels heuristischem und analytischem Wissen die Fuzzy-Modelle konfiguriert werden. Die Erstellung der Fuzzy-Modelle wird mit DynStar auf der Basis von Prozeßdatensätzen anhand signifikanter Meßdatensätze aus Experimenten an der Versuchsanlage DHM, sowie deren Nachrechnung und Simulationen mit dem ATHLET-Code ausgeführt.

Anhand der Datenbasis und der Prozeßkenntnis wird die Regelbasis mit den Einzelregeln für das Fuzzy-Modell aufgestellt. Dies gestattet eine effektive Realisierung der Regelbasis aufgrund von dominanten Einzelregeln. Eine strenge Monotonie oder Stetigkeit des Kennfeldes (glatte Kennfläche und vollständige Regelbasis) ist bei der Anwendung für nichtregelungstechnische Aufgaben nicht zwingend erforderlich. Die hier aufgezeigte Regelbasis ist ein mögliches Beispiel für die Modellierung des Füllstandes im Druckbehälter.

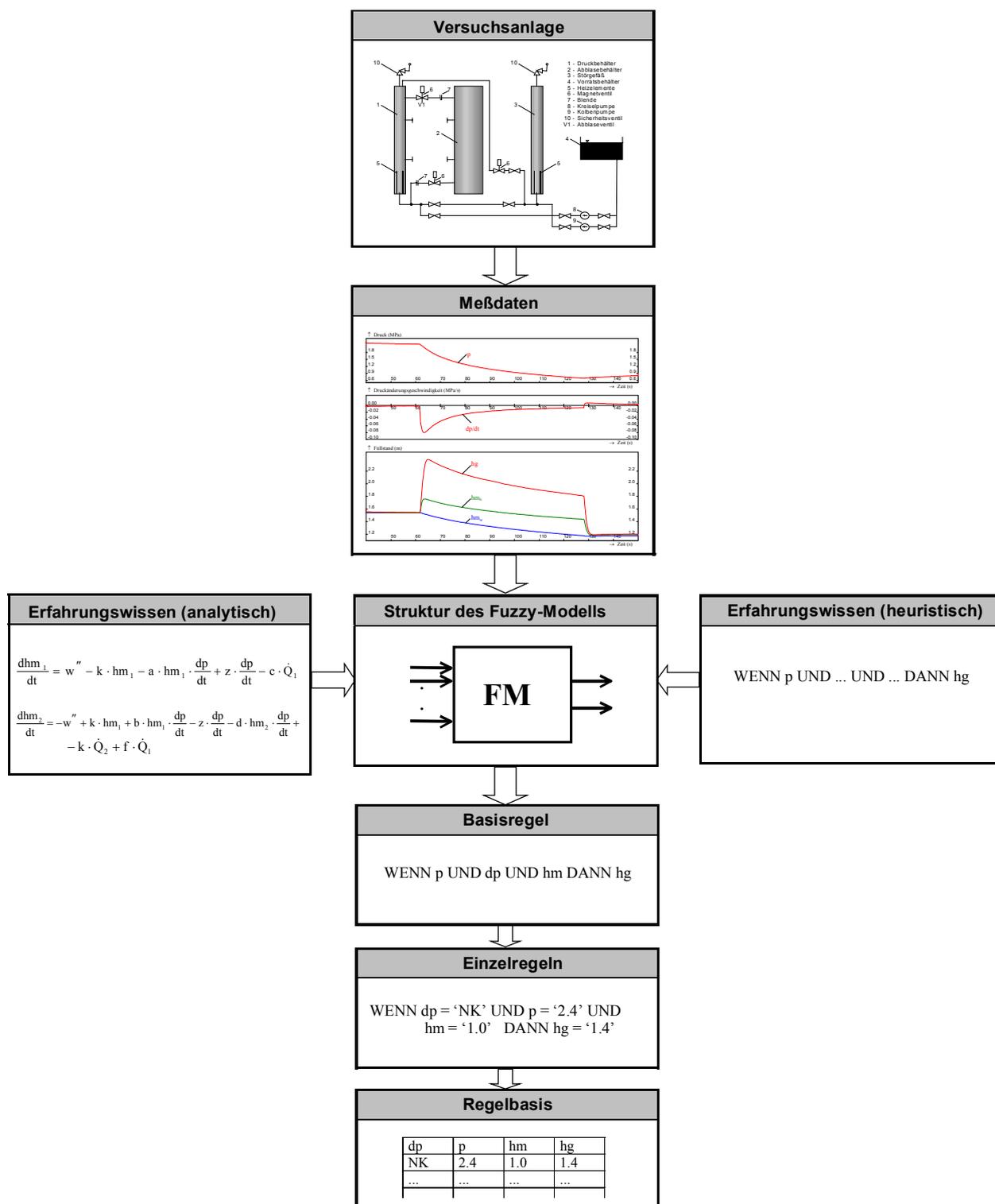


Bild 2-4: Methodik der Fuzzy-Modellbildung am Beispiel Druckbehälter mit siedendem Medium

2.2.2 Fuzzy-Modell mit externer Dynamik

Um dynamische Prozesse und Nichtlinearitäten wie transiente Vorgänge mittels der Fuzzy-Set Theorie nachbilden zu können, ist es notwendig, die Zeitabhängigkeit in einer bestimmten Struktur zu realisieren [Ste96]. Dafür wurde ein prozessspezifisches Fuzzy-Modell mit

externer Dynamik entwickelt, das es gestattet, die Dynamik in einer geeigneten, übersichtlichen Form wiederzugeben. Die weiteren Erläuterungen und Untersuchungen sind [Fens97-2, 3; Käst98-1, 00-2; Hamp99-2, 00; Trai00] entnommen.

Um das dynamische Verhalten eines Prozesses wiederzugeben, wird in der klassischen Methodik ein Differentialgleichungsansatz gewählt (analytische Lösung). Im einfachsten Fall ist das in Gleichung (2.6) eine lineare Differentialgleichung (DGL) erster Ordnung mit inhomogenem Anteil. Die Darstellung in der Regelungstechnik erfolgt über ein klassisches PT1-Glied (Verzögerungsglied erster Ordnung). Diese Struktur ist äquivalent zu einer linearen Zustandsdifferentialgleichung 1. Ordnung (Matrizenschreibweise) in der Zustandsraumdarstellung (Bild 2-5).

$$\frac{dq(t)}{dt} = -\frac{1}{T} \cdot q(t) + \frac{k}{T} \cdot u(t)$$

$$\frac{dq(t)}{dt} = \mathbf{A} \cdot q(t) + \mathbf{B} \cdot u(t) \quad \text{mit } q(t) = \int \dot{q}(t) dt \quad (2.6)$$

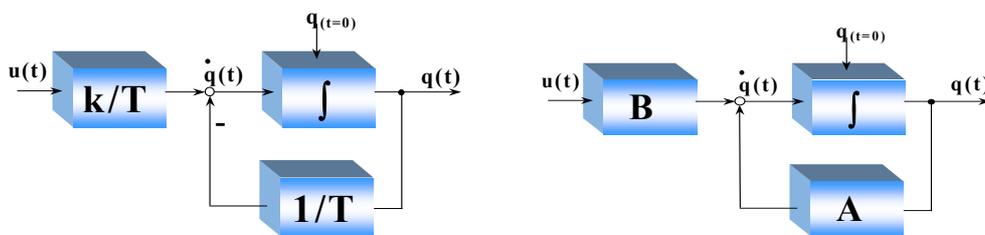


Bild 2-5: Darstellung eines PT1-Gliedes sowie einer linearen Zustandsdifferentialgleichung 1. Ordnung (k-Verstärkungsfaktor, T-Zeitkonstante, A-Systemmatrix, B-Steuermatrix)

Aus der klassischen Darstellung des PT1-Gliedes in Bild 2-5 läßt sich durch Zusammenfassen das Fuzzy-Modell mit externer Dynamik ableiten (Bild 2-6). Als Vorteil beinhaltet das Fuzzy-Modell die Nichtlinearitäten der Parameter k und T für einen nichtlinearen Prozeß, eine separate Kenntnis von k und T ist nicht mehr unbedingt erforderlich. Die Ein- und Ausgangsgrößen eines klassischen Fuzzy-Modells bleiben auch beim dynamischen Fuzzy-Modell erhalten. Das dynamische Modell umfaßt den eigentlichen Fuzzy-Algorithmus, die Integration der direkten Ausgangsgröße des Fuzzy-Modells sowie die Rückführung des integrierten Ausgangssignals (hier: Rückführung mit Verstärkung = 1).

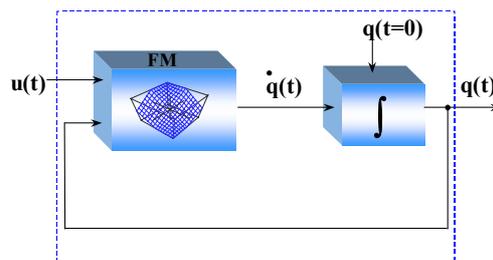


Bild 2-6: Darstellung der Struktur des Fuzzy-Modells mit externer Dynamik

Damit ist die direkte Ausgangsgröße des Fuzzy-Algorithmus die zeitliche Ableitung (Gradient oder Änderungsgeschwindigkeit) der gewünschten Ausgangsgröße ($\dot{q} = f_{FM}(q, u)$). Diese Größe wird integriert und als weitere Eingangsgröße auf das Fuzzy-Modell zurückgeführt. Von Vorteil ist, daß der Gradient von direkten Meßgrößen eine physikalisch interpretierbare Größe ist, die eine Aussage über die Dynamik des Prozeßzustandes liefert. Da der Gradient eine äußerst sensitive Größe ist, sind zur Beschreibung von dynamischen Prozessen mit linguistischen Variablen meist mehr Zugehörigkeitsfunktionen für die Ausgangsgröße bzw. deren zeitliche Ableitung notwendig (Sensitivität Richtung Nullpunkt), als üblicherweise verwendet werden. Bild 2-6 stellt die Struktur des Fuzzy-Modells mit externer Dynamik als Blockschaltbild dar. Die dazugehörige Gleichung (2.7) in Form einer Basisregel lautet:

$$\text{WENN } u \text{ UND } q \text{ DANN } \dot{q} \quad (2.7)$$

Der Zeitschritt für die stabile Abarbeitung der Algorithmen (Abtastzeit) ist abhängig von der kleinsten Zeitkonstante des Prozesses. Üblicherweise ist dies gewährleistet, wenn gilt [Ack83; Böhm93; Föll94; Iser87, 88; Stro75; Unbe94; Wern89]:

$$t_A = \frac{1}{10} T_{\min} \quad (2.8)$$

Der Stabilitätsnachweis für das Fuzzy-Modell mit externer Dynamik wird aus der Prozeßkenntnis abgeleitet. Möglichkeiten für einen mathematischen Stabilitätsnachweis für nicht-lineare Modelle wie Fuzzy-Modelle werden in [Bret95; Miku99-1; Opit93; Titl97] dargestellt. Prinzipiell lautet die Definition so, daß ein geschlossenes System stabil genannt wird, wenn das Fuzzy-Modell tolerierbare und sichere Werte für die Ausgangsgrößen für begrenzte interne und externe Störungen garantiert (Bewegung im Arbeitsbereich) [Miku99-2]. Die Zielstellung ist, den Nachweis zu führen, daß mit dem Fuzzy-Modell mit externer Dynamik sowohl die Dynamik als auch die Statik des Prozesses abbildbar sind. Die Analyse des Fuzzy-Modell mit externer Dynamik wird anhand einer vergleichenden Betrachtung für die Simulation eines PT1-Übertragungsverhaltens geführt. Verglichen werden dabei die Simulation mit der klassischen analytischen DGL und dem Fuzzy-Modell mit externer Dynamik entsprechend Bild 2-7.

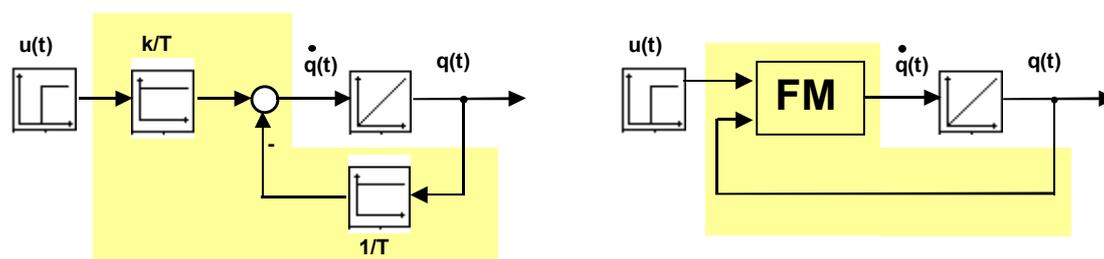


Bild 2-7: Signalflußbild des PT1-Übertragungsgliedes und des Fuzzy-Modells mit externer Dynamik (für die Eingangsgröße u wird eine Sprungfunktion von 0 auf den Wert 1 gewählt)

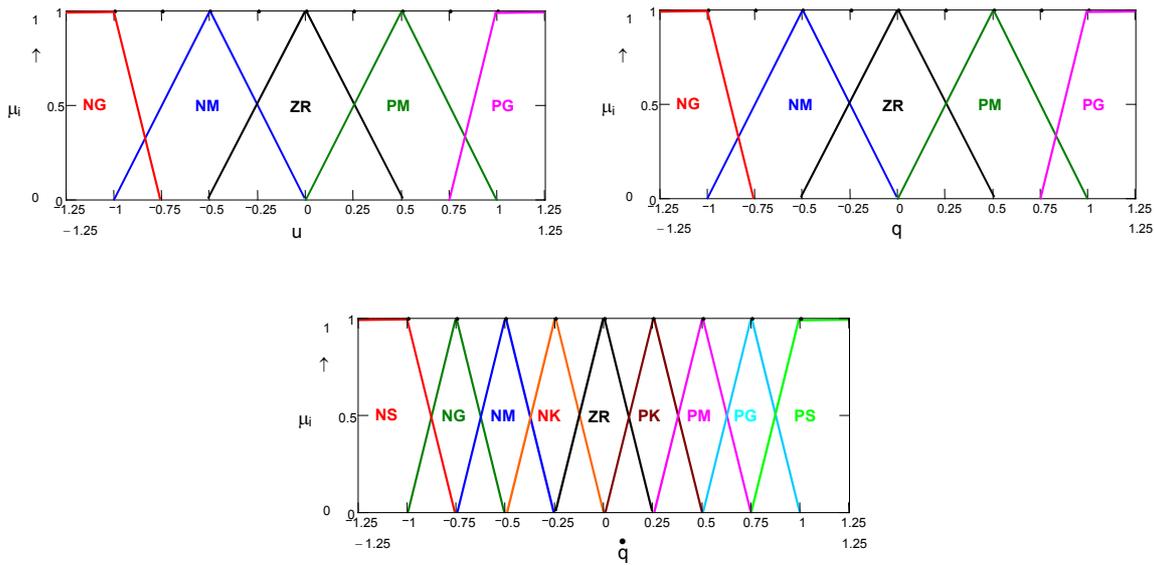


Bild 2-8: Verteilung der Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Variablen u , q und \dot{q} des Fuzzy-Modells mit externer Dynamik (FM1) in der Ausgangsvariante

Anhand der Struktur des Fuzzy-Modells und der Basisregel sowie der Definition der linguistischen Variablen und deren Zugehörigkeitsfunktionen wird die Regelbasis mit den Einzelregeln erstellt und in einer Regelmatrix zusammengefaßt. Tabelle 2-2 gibt die generierte Regelmatrix für die erstellten Fuzzy-Modelle mit externer Dynamik FM1 und FM2 wieder. Die Deformierung des Kennfeldes erfolgt ausschließlich über die asymmetrische Verteilung der Zugehörigkeitsfunktionen. Der Vorteil dabei ist, daß hier die Regelmatrix für die verschiedenen Fuzzy-Modelle mit externer Dynamik gleichbleibt.

Tabelle 2-2: Regelbasis in Form einer Regelmatrix für die Fuzzy-Modelle mit externer Dynamik FM1 und FM2

		q					
		q̇	<i>NG</i>	<i>NM</i>	<i>ZR</i>	<i>PM</i>	<i>PG</i>
u	<i>NM</i>	ZR	NK	NM	NG	NS	
	<i>NM</i>	PK	ZR	NK	NM	NG	
	<i>ZR</i>	PM	PK	ZR	NK	NM	
	<i>PM</i>	PG	PM	PK	ZR	NK	
	<i>PG</i>	PS	PG	PM	PK	ZR	
	<i>PG</i>						

Eingangsgrößen des Fuzzy-Modells mit externer Dynamik sind die Eingangsgröße u und die rückgekoppelte Größe q , die Ausgangsgröße des Fuzzy-Algorithmus ist die zeitliche Ableitung \dot{q} der Größe q . Die Übertragungsfunktion des Fuzzy-Modells (im Bild 2-6 als Kennfeld gezeigt) kann als nichtlineare Verstärkung interpretiert werden, die die Elemente k/T und $1/T$ sowie das Minuszeichen der Rückführung (entsprechend PT1) enthält. Die Verteilung der Zugehörigkeitsfunktionen für diese linguistischen Variablen erfolgt gemäß Bild 2-8 symmetrisch (Ausgangsvariante). Für das klassische PT1-Glied wurden die Werte $k = 1$ und $T = 2$ s gewählt. Die Eingangsgröße u wird bei einer Simulationszeit $t = 1$ s auf den Wert 1 gesetzt

(Sprungfunktion). Mit diesen Zugehörigkeitsfunktionen wird das klassische PT1-Glied mittels des Fuzzy-Modells mit externer Dynamik exakt nachgebildet (Übereinstimmung, Bild 2-11).

Analyse I (Deformation \dot{q})

Für den beispielhaften Vergleich kommen zwei Modifikationen des Fuzzy-Modells mit externer Dynamik (FM1, FM2) zum Einsatz. FM1 als Ausgangsvariante ist gekennzeichnet durch symmetrische Verteilung der Zugehörigkeitsfunktionen der Größe \dot{q} (Bild 2-9, links), hieraus ergibt sich ein ebenes Kennfeld (Bild 2-10). Das dynamische Fuzzy-Modell FM2 ist charakterisiert durch asymmetrisch verteilte Zugehörigkeitsfunktionen der zeitlichen Ableitung \dot{q} (Bild 2-9, rechts), hieraus ergibt sich ein deformiertes Kennfeld (Bild 2-10).

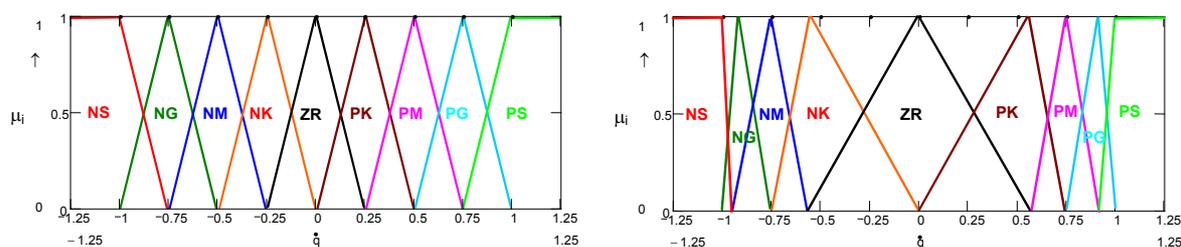


Bild 2-9: Zugehörigkeitsfunktionen der Variablen \dot{q} von FM1 (links, symmetrisch verteilt) und FM2 (rechts, asymmetrisch verteilt)

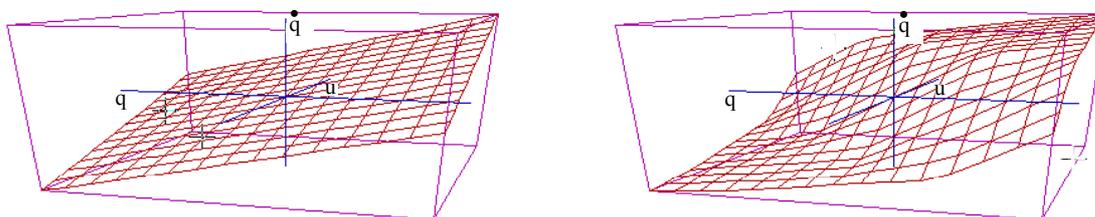


Bild 2-10: Kennfeld Fuzzy-Modell mit externer Dynamik FM1 (links, ebenes Kennfeld)
Kennfeld Fuzzy-Modell mit externer Dynamik FM2 (rechts, deformiertes Kennfeld)

Die Art und Weise der Deformation führt zu einer Beeinflussung der Zeitkonstante T , die stationären Endwerte (Übertragungsfaktor k) werden nicht beeinflusst. Zu sehen ist dies an den Simulationsergebnissen im Bild 2-11 für die Analyse I. Rechts im Bild 2-11 ist zu erkennen, daß das Fuzzy-Modell 2 mit externer Dynamik (q_{FM2}) dynamisch schneller reagiert als das klassische PT1-Glied (q_{PT1}). Für das Fuzzy-Modell 1 wird aufgrund der symmetrischen Verteilung die Übereinstimmung zu der Größe q_{PT1} erreicht (linke Bilder).

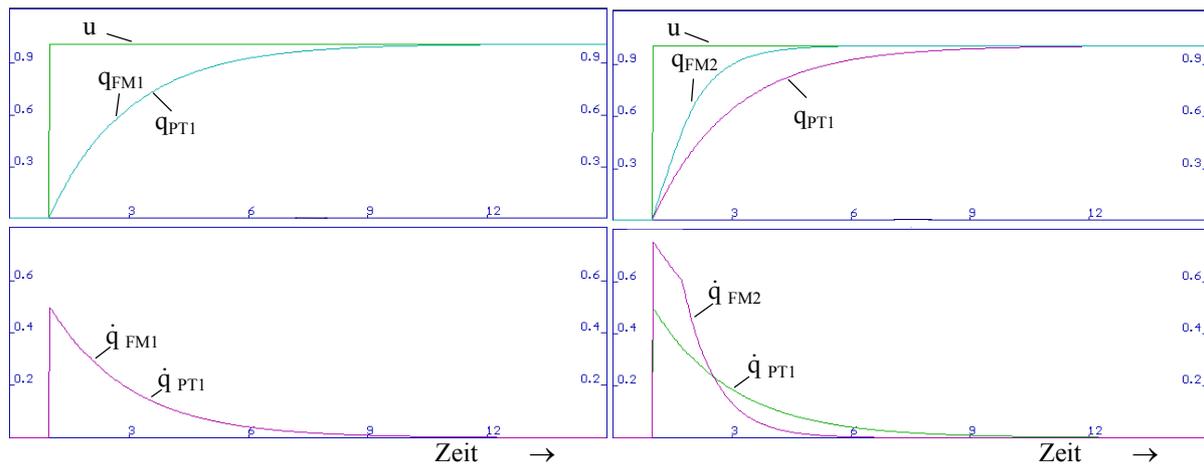


Bild 2-11: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Größen q und \dot{q} des FM1 ($T = 2$ s) und klassischen PT1 ($T= 2$ s) (Übereinstimmung), linke Bilder
Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Größen q und \dot{q} des FM2 ($T \approx 1$ s) und klassischen PT1 ($T= 2$ s) (Fuzzy-Modell mit externer Dynamik dynamisch schneller), rechte Bilder

Analyse II (Deformation q)

Bei dieser Analyse wird nicht eine Deformation der Zugehörigkeitsfunktionen der zeitlichen Ableitung vorgenommen, sondern eine andere Verteilung der Zugehörigkeitsfunktionen für die Größe q (Ausgangsgröße des Fuzzy-Modells mit externer Dynamik) gewählt. FM1 als Ausgangsvariante ist hierbei wieder gekennzeichnet durch symmetrische Verteilung der Zugehörigkeitsfunktionen der Größe q (Bild 2-12, Kennfeld: Bild 2-13). Das dynamische Fuzzy-Modelle FM2 ist charakterisiert durch asymmetrisch verteilte Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgangsgröße q (Bild 2-12), hieraus ergibt sich ein deformiertes Kennfeld (Bild 2-13). Die Art und Weise der Deformation führt zu einer Beeinflussung der Zeitkonstante T , die stationären Endwerte (Übertragungsfaktor k) werden nicht beeinflusst, wie die Simulationsergebnisse im Bild 2-14 für die Analyse II zeigen. Für das Fuzzy-Modell 1 (q_{FM1}) wird aufgrund der symmetrischen Verteilung die Übereinstimmung zu der Größe q_{PT1} erreicht (linke Bilder). Im Bild rechts ist zu sehen, daß das Fuzzy-Modell 2 mit externer Dynamik (q_{FM2}) dynamisch schneller reagiert als das klassische PT1-Glied (q_{PT1}). Die Modifikation der Setverteilung der Ausgangsgröße führt zur Deformation des Kennfeldes und hat somit Auswirkungen auf die Dynamik des Fuzzy-Modell mit externer Dynamik. Das bedeutet, daß die Parameter k und T arbeitspunktabhängig sind. Eine Übereinstimmung zum klassischen Modell wird wieder erzielt, wenn die Zeitkonstante des PT1-Gliedes entsprechend angepaßt wird. Der Vorteil des Fuzzy-Modells besteht damit in der vereinfachten Modellierung der Nichtlinearität von k und T ohne genaue Kenntnis beider exakter Werte.

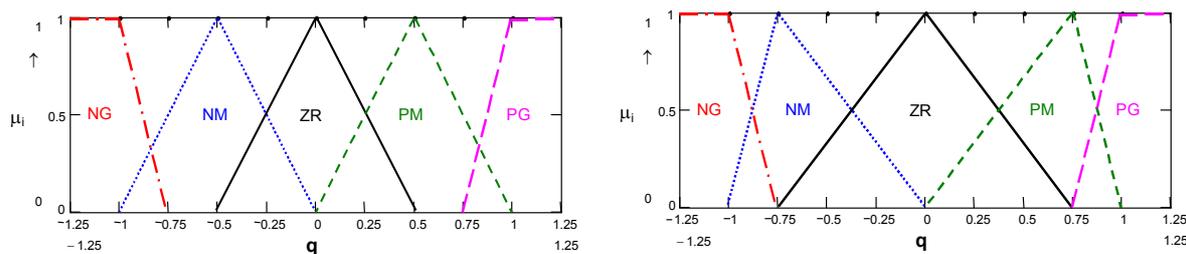


Bild 2-12: Zugehörigkeitsfunktionen der Größe q von FM1 (links) und FM2 (rechts)

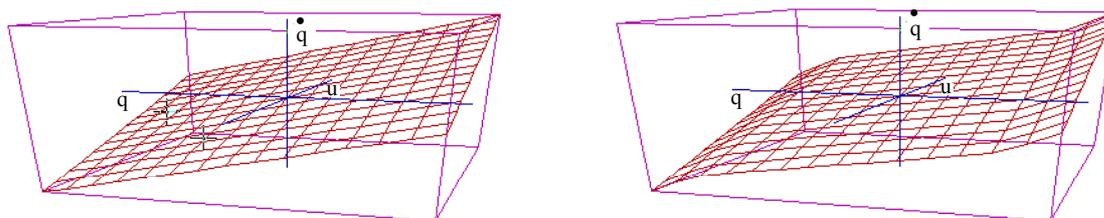


Bild 2-13: Kennfeld Fuzzy-Modell mit externer Dynamik FM1 (links, ebenes Kennfeld) und FM2 (rechts, deformiertes Kennfeld)

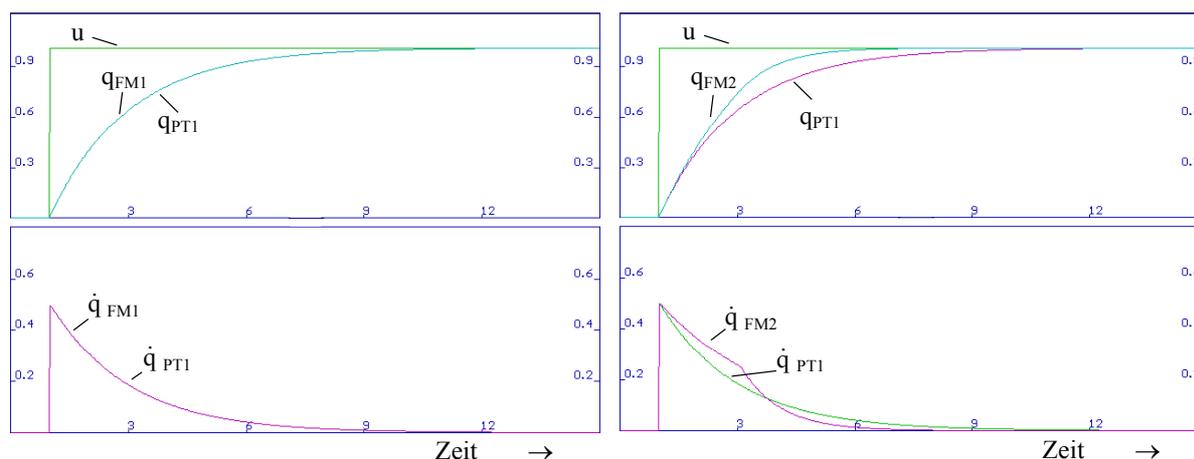


Bild 2-14: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Größen q und \dot{q} des FM1 ($T = 2$ s) und klassischen PT1 ($T = 2$ s) (Übereinstimmung) linke Bilder
Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Größen q und \dot{q} des FM2 ($T \approx 1,5$ s) und klassischen PT1 ($T = 2$ s) (Fuzzy-Modell mit externer Dynamik dynamisch schneller) rechte Bilder

Eine weitere Analyse wurde zur Variation der Regelmatrix durchgeführt. Dabei weist die Regelmatrix des FM1 einmal in der Hauptdiagonale die Werte ZR (Zero) auf (rechte obere Dreiecksmatrix negative Werte und linke untere Dreiecksmatrix die positiven Werte der Ausgangsgröße). Für die zweite Simulation weist die Regelmatrix in der Nebendiagonale die Werte ZR (Zero) auf (linke obere Dreiecksmatrix negative Werte und rechte untere Dreiecksmatrix positive Werte der Ausgangsgröße). Infolge der geänderten Gestaltung der Regelmatrix wird das System instabil, d. h. diese Matrixgestaltung ist vergleichbar mit der

Vorgabe eines positiven Eigenwertes in der DGL (fehlendes Minuszeichen in der Rückkopplung des PT1).

Die Statik (der Übertragungsfaktor k) des Fuzzy-Modells mit externer Dynamik wird beeinflusst, wenn der Wertebereich der Zugehörigkeitsfunktionen der Zustandsgröße q verändert wird. Die vergleichende Betrachtung für ein statisches Fuzzy-Modell ist wieder gekennzeichnet durch unterschiedliche Gestaltungen der Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgangsgröße q . Die Analysen haben ergeben, daß für symmetrisch verteilte Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgangsgröße q sich ein ebenes Kennfeld und damit ein linearer Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgröße ergibt. Bei asymmetrisch verteilten Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgangsgröße q ergeben sich analog zu den Analysen I und II deformierte Kennfelder.

Für die deformierten Kennfelder ist der Zusammenhang zwischen Ausgangsgröße und Eingangsgröße damit nichtlinear. Schlußfolgernd hat die Art und Weise der Deformation Auswirkungen auf den Zusammenhang zwischen Ausgangsgröße und Eingangsgröße ($q = f(u)$). Im Umkehrschluß ist für nichtlineare Prozesse eine asymmetrische Verteilung der Zugehörigkeitsfunktionen unumgänglich, um die Statik korrekt nachzubilden.

Zusammenfassende Bewertung

- ⇒ Das Fuzzy-Modell mit externer Dynamik ist für die Modellierung dynamischer Vorgänge geeignet.
- ⇒ Das Fuzzy-Modell mit externer Dynamik beinhaltet wesentliche Elemente der Grundstruktur einer DGL 1. Ordnung.
- ⇒ Die Beeinflussung der Zeitkonstante T des Fuzzy-Modell mit externer Dynamik erfolgt durch die Deformation des Kennfeldes durch eine asymmetrische Verteilung der Zugehörigkeitsfunktionen.
- ⇒ Die Beeinflussung des Übertragungsfaktors k des Fuzzy-Modell mit externer Dynamik erfolgt durch die Vorgabe des Wertebereiches der Eingangsgrößen u und der Eingangsgröße q (Rückkopplung) entsprechend dem statischen Zusammenhang $q/u = k$.
- ⇒ Das negative Vorzeichen der Rückkopplung (vgl. Signalflußbild der DGL) wird durch die Gestaltung der Regelmatrix definiert.

Im Ergebnis bietet das Fuzzy-Modell mit externer Dynamik die Möglichkeit, beliebige lineare oder nichtlineare Prozesse zu modellieren, wie an einem einfachen Beispiel nachgewiesen wurde. Es wurde gezeigt, wie ein Fuzzy-Modell mit externer Dynamik zu konfigurieren und zu parametrieren ist, um das gewünschte Verhalten nachzubilden. Daher kann das Fuzzy-Modell mit externer Dynamik auf den hier vorliegenden und zu modellierenden Prozeß angewendet werden.

2.3 Hybride Modelle

Durch die Möglichkeit, Fuzzy-Algorithmen zur Parameter- und Modelladaption einzusetzen, ist die Entwicklung fortgeschrittener, hybrider modellgestützter Meßverfahren realisierbar. Als Basis gelten die analytischen, nichtlinearen Zustandsgleichungen mit den klassischen Zustandsdifferentialgleichungen. Eine Kombination der Zustandsgleichungen und Fuzzy Algorithmen entsteht, wenn Parameter oder Teilmodelle basierend auf den Verfahren des Soft Computing in die DGL implementiert werden. Für nichtlineare Beobachter ergeben sich dabei folgende Varianten:

- ⇒ Algorithmen für die Adaption der nichtlinearen Rückführung bzw. der Verstärkungsmatrix,
- ⇒ Algorithmen für die Adaption von physikalischen Parametern und Teilmodellen,
- ⇒ Algorithmen für die Adaption des gesamten Modells in Form eines nichtlinearen Parallelmodells.

Eine allgemeine Beschreibung eines hybriden nichtlinearen Modells unter Verwendung der Fuzzy-Set Theorie liefern die nachstehenden hybriden, nichtlinear zeitinvarianten Beobachtergleichungen (2.9) und (2.10):

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= f(\hat{x}, u, q) + K(\hat{x}, u) && \text{Zustandsdifferentialgleichung} && (2.9) \\ \text{mit } \hat{x}(t_0) &= \hat{x}_0 \end{aligned}$$

$$\hat{y} = h(\hat{x}) \quad \text{Meßgleichung} \quad (2.10)$$

$$\text{mit } \dot{q} = \frac{dq}{dt}, \quad \frac{dq}{dt} = f(u, q) \text{ und}$$

$$\dot{q} + q = \text{defuzz}(\text{FM}(u)) \quad \text{mit FM – Fuzzy-Modell} \quad (2.11)$$

Darin bilden die Gleichungen (2.9) und (2.10) das nichtlineare analytische Beobachterbasismodell. Die Größe q wird aus dem Fuzzy-Modell (2.11) berechnet (siehe Bild 2-6) und als scharfer Wert dem analytischen Beobachtermodell zugeführt. Die Beobachtbarkeit und Stabilität des für das Prozeßbeispiel entwickelten Hybridmodells wird aus dem nichtlinearen Parallelmodell und der Prozeßkenntnis abgeleitet. Zur Simulation der Strukturen wird die leistungsfähige, validierte Fuzzy-Shell des Programmsystems DynStar verwendet [DynS00]. Damit ist eine parallele, zeitgleiche Simulation der implementierten Fuzzy-Algorithmen und des nichtlinearen, analytischen Basismodells möglich.

2.4 Schlußfolgerungen

Ausgehend von der Analyse der Ursachen für auftretende Abweichungen zwischen Prozeß und modellgestütztem Meßverfahren ergeben sich die Möglichkeiten für die Einbeziehung der Algorithmen des Soft Computing in modellgestützte Meßverfahren mit nichtlinearem Modellansatz. Die Bewertung dieser neuen Verfahren erfolgt nach folgenden Kriterien:

- ⇒ Güte der Rekonstruktion bei sich ändernden Prozeßbedingungen (Störungen, Änderung des Betriebsregimes, Abweichung vom Arbeitspunkt),
- ⇒ Entwurfsaufwand und Gültigkeitsbereich des modellgestützten Meßverfahrens.

Bei dem Entwurf der fortgeschrittenen modellgestützten Meßverfahren zur Modellierung des Füllstands im Druckbehälter mit siedendem Medium werden zwei Wege verfolgt:

1. Entwicklung von hybriden Beobachtermodellen auf der Basis eines analytischen nichtlinearen Parallelmodells unter Einbeziehung von Fuzzy Algorithmen zur Kompensation der Nichtlinearitäten von Parametern,
2. Entwicklung neuer fuzzy-basierter Parallelmodelle zur Erweiterung des Gültigkeitsbereiches bei eingeschränkter Funktion der Meßsysteme.

Das bedeutet:

- ⇒ die Überführung der Modelle in die erforderliche Darstellungsform,
- ⇒ die Gewährleistung der Einfachheit und Robustheit der Modelle hinsichtlich der Forderung nach Echtzeitfähigkeit für eine Prozeßüberwachung,
- ⇒ ein vertretbares Maß des Entwicklungsaufwandes.

Für den Entwurf der Füllstandsmodelle für die kontinuierliche Prozeßbeobachtung ist die Zusammenstellung der entworfenen Modellredundanzen und deren Kombination mittels Modellumschaltung erforderlich, um eine Lösung für die Aufgabenstellung zu erreichen. Die weitere Vorgehensweise besteht zunächst in der Beschreibung und Analyse der Spezifik des Prozeßbeispiels Füllstandsmessung im Druckbehälter. Dazu gehören das Aufstellen des nichtlinearen analytischen Zustandsraumbasismodells und die Klassifikation der Nichtlinearitäten und der Unschärfen des Prozesses, um darauf aufbauend die neuen fortgeschrittenen modellgestützten Meßverfahren zu entwickeln.

3 Experimentelle und analytische Bestimmung des Füllstandes in Druckbehältern während negativer Drucktransienten

Das Ziel ist die Generierung der Datenbasis für die kontinuierliche, modellbasierte Beobachtung des Füllstandes als sicherheitsrelevante Größe in einem Druckbehälter mit siedendem Zweiphasengemisch Wasser-Dampf. Die Vorgehensweise wird gestaltet, wie bereits in Bild 1-1 beschrieben; Durchführung der Experimente, Nachrechnungen und Simulationen mit dem ATHLET-Code, Erstellung des analytischen Modells zur Füllstandsbeobachtung auf der Basis der analytischen Redundanz (modellgestützte Meßverfahren) und dessen rechentechnische Umsetzung. Aus der Prozeßspezifik und dem analytischen Modell sind die Nichtlinearitäten und Unschärfen des Prozesses zu analysieren. Das nichtlineare Modell wird als Parallelmodell (erstes Verfahren) zur Zustandsrekonstruktion eingesetzt, getestet und bewertet. Aus den letzten beiden Punkten werden die Folgearbeiten zur Verbesserung der Rekonstruktionsgüte hinsichtlich der Problemstellungen abgeleitet.

3.1 Experimente und Simulationen zur Bestimmung des Füllstandes

3.1.1 Füllstandsmessung am Druckbehälter

Zur Durchführung der Experimente wurde die Versuchsanlage DHM als Referenzanlage (Anhang A 1) gewählt. Mit der Versuchsanlage lassen sich transiente Vorgänge (Leckstörfälle) im Druckbehälter im Druckbereich von $p = 0,1 \dots 2,5$ MPa simulieren. Damit können thermodynamische Einzeleffekte, wie Sieden an Heizstäben (Ausbildung von Dampfgehaltsverteilungen) und Ausbildung des Gemischfüllstandes reproduziert werden.

Zur Analyse dieser Effekte sind an der Anlage hydrostatische Füllstandsmeßsysteme (siehe Bild 1-2) in unterschiedlichen Meßbereichen (unterschiedliche Höhe der Einbindungen) installiert (Anhang A 1.1). Die Meßsysteme dienen der Bestimmung der Massenfüllstände (Weit- und Nahbereich). Der sich durch das siedende Medium ausbildende Gemischfüllstand ist mit herkömmlichen Methoden wie der hydrostatischen Füllstandsmessung nicht meßbar. Der Massenfüllstand (Weitbereich) wird bestimmt über eine

⇒ Füllstandsmessung mit Einkammerpegelgefäß (EKPG), Meßbereich: 0,1 - 3,8 m (Anhang A 1.1, Höhe des Druckbehälters 4,0 m).

Der Massenfüllstand (Nahbereich) in Druckbehältern ist eine direkt meßbare Zustandsgröße. An der Versuchsanlage DHM stehen drei Füllstandsmeßsysteme für den Nahbereich mit unterschiedlichen Meßbereichen zur Verfügung:

⇒ Füllstandsmessung mit Einkammerpegelgefäß (EKPG), Meßbereich: 1,0 - 2,8 m

⇒ Füllstandsmessung mit Zweikammerpegelgefäß (ZKPG), Meßbereich: 1,0 - 1,6 m

⇒ Füllstandsmessung mit Nullkammerpegelgefäß (NKPG), Meßbereich: 0,8 - 1,8 m

Die untere Einbindung des ZKPG befindet sich auf der Höhe der unteren Einbindung der Meßstelle mit dem EKPG. Damit wirken die gleichen prozeßspezifischen Einflüsse auf beide Meßsysteme und die Meßsignale sind vergleichbar. Die Dampfbildung in den Zonen unter-

halb der unteren Einbindung und zwischen den Einbindungen hat bei störungsbedingten Übergangsvorgängen mit negativen Drucktransienten einen wesentlichen Einfluß auf die Ausbildung des Massenfüllstandes (Nahbereich) und den Gemischfüllstand. Der Dampfgehalt unterhalb der unteren Einbindung und zwischen den Einbindungen des Nahbereichsmeßsystems ist ebenfalls mit herkömmlichen Methoden nicht meßbar.

3.1.2 Generierung der Datenbasis

3.1.2.1 Beschreibung der Experimente

Zur Analyse der Einflußgrößen auf die meßbaren und nichtmeßbaren Zustandsgrößen sowie zur Generierung der Datenbasis für die fuzzy-basierten Algorithmen wurden an der Versuchsanlage DHM eine Reihe von Abblaseexperimenten mit negativen Drucktransienten (oder kurz Experiment) durchgeführt, was einer plötzlichen Druckentlastung durch Abblasen von Dampf (Leckstörfall durch Dampfleck) entspricht. Die Simulation von Leckstörfällen, in deren Folge die negativen Drucktransienten auftreten, werden durch den Abblasestutzen oben am Behälter ermöglicht. Über entsprechende Blendendurchmesser in dem Stutzen kann der Wert des negativen Druckgradienten variiert werden. Der Anhang A 1.2 gibt eine Übersicht über alle durchgeführten Abblaseexperimente unter Angabe der jeweiligen Anfangsdrücke und Anfangsmassenfüllstände (Massenfüllstand (Weitbereich)) sowie eine Kurzbeschreibung des Versuchsablaufes. Eine Datenanalyse sowie eine Analyse und Ermittlung signifikanter Prozeßwerte geben Anhang A 1.4 bis A 1.6.

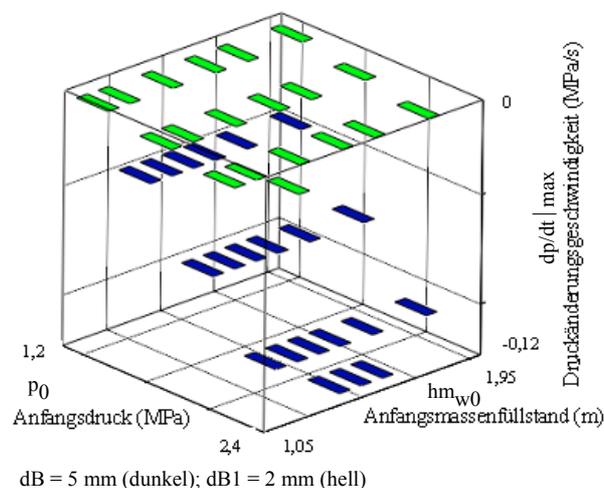


Bild 3-1: Maximal erreichte Druckänderungsgeschwindigkeit $dp/dt|_{\max}$ bei den durchgeführten Experimenten und Simulationen in Abhängigkeit von Anfangsdruck p_0 und Anfangsmassenfüllstand hm_{w0} sowie für beide verwendete Blendendurchmesser

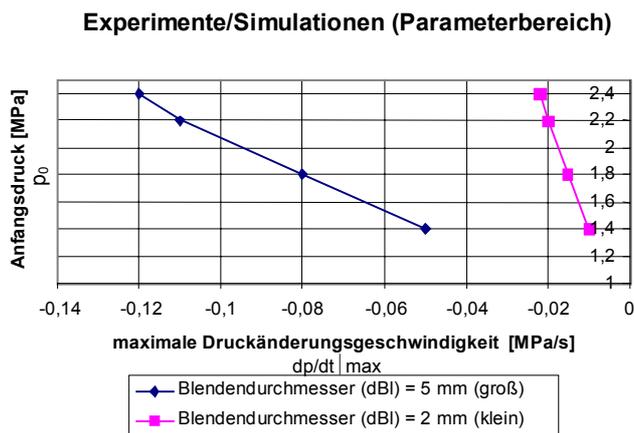


Bild 3-2: Parameterbereich für die durchgeführten Experimente/Simulationen entsprechend der Versuchsanlage DHM, Anfangsdruck p_0 und dazugehörige maximale Druckänderungsgeschwindigkeit $dp/dt|_{\max}$ für beide verwendete Blendendurchmesser

Für die Abblaseexperimentreihe 2 (gleicher Enddruck, unterschiedliche Abblasezeiten mit EKPG – Nahbereich, Anhang A 1.2) wurden die Anfangsbedingungen vor der Druckentlastung, die durch den Anfangsdruck und den Anfangsfüllstand (Weitbereich) definiert sind, im technisch relevanten Bereich der Versuchsanlage variiert (Bild 3-1). Der Anfangsdruck wurde innerhalb des Parameterbereiches $p_0 = 1,4 \dots 2,2$ MPa und der Massenfüllstand (Weitbereich) für $hm_{w0} = 1,05 \dots 1,95$ m variiert. Zur Modifikation der Druckänderungsgeschwindigkeit wurden zwei verschiedene Blendendurchmesser $d_{bl} = 2$ mm und 5 mm gewählt. Die kleine Blende (2 mm, hell) repräsentiert den geringen Parameterbereich, während die größere Blende (5 mm, dunkel) den hohen Parameterbereich charakterisiert. Dies entspricht dem Parameterbereich eines kleinen und eines großen Lecks im Dampfbereich des Druckbehälters an der Versuchsanlage (Bild 3-2).

3.1.2.2 Simulationen mit dem ATHLET-Code

Mit dem ATHLET-Code wurden die Experimente anhand des Datensatzes für die Versuchsanlage nachgerechnet (Anhang A 1.3). Das dient der Bereitstellung der nichtmeßbaren Zustandsgrößen wie dem Gemischfüllstand sowie weiterer physikalischer Parameter zu Vergleichszwecken. Weiterhin wurden zur Erweiterung der Datenbasis zusätzlich Simulationsrechnungen von negativen Drucktransienten im Parameterbereich der Anlage $p_0 = 1,4 \dots 2,4$ MPa mit dem ATHLET-Code durchgeführt (Experimentreihe 1, unterschiedlicher Enddruck, gleiche Abblasezeiten mit ZKPG). Der ATHLET-Code wird im folgenden als Vergleichsprozess (=Prozeß) bei der Darstellung der Simulationsergebnisse verwendet, um die Qualität der Rekonstruktion durch die Modelle zu überprüfen, auch bei den nichtmeßbaren Zustandsgrößen. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, daß der ATHLET-Code die Vorgänge im Druckbehälter richtig widerspiegelt [Fens97-1; Käst96; Hamp99-1]. Die mittels ATHLET-Code berechneten Größen charakterisieren dann den im Druckbehälter vorherrschenden Prozeßzustand und werden zur Verifikation des Zustandsraummodells und der modellgestützten Meßverfahren herangezogen.

3.1.2.3 Ergebnisse

Den zeitlichen Verlauf des Druckes, der Druckänderungsgeschwindigkeit sowie der Füllstandsverläufe während einer negativen Drucktransiente zeigt das Bild 3-3 anhand des Experimentes 48 mit dem Anfangsdruck $p_{z0} = 2,2$ MPa, dem Anfangsfüllstand (Weitbereich) $hm_{w0} = 1,55$ m und der großen Blende.

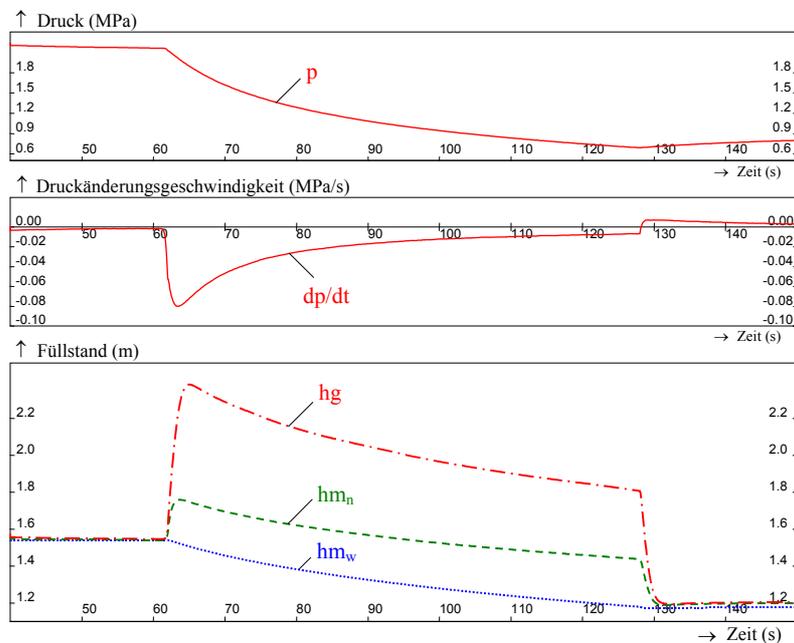


Bild 3-3: Darstellung des Druckverlaufes (p), der Druckänderungsgeschwindigkeit (dp/dt) und der Füllstandsverläufe (hg , hm_n , hm_w) infolge einer negativen Drucktransiente von 2,2 MPa auf 0,7 MPa im Zeitraum $t = 62 \dots 126$ s, Experiment 48

Der Verlauf des Gemischfüllstandes wird durch den ATHLET-Code zur Verfügung gestellt. Wie hier und in den gesamten folgenden Abschnitten sind in den Grafiken die Meß- und Simulationswerte für alle Signale in absoluter Höhe bzw. Größe angegeben. Der Bezugspunkt ist die Bodenplatte des Druckbehälters. Vor der Druckentlastung herrscht im Druckbehälter ein konstanter Druck. Die angezeigten Füllstände haben etwa das gleiche Niveau. Durch das Öffnen des Lecks (Druckentlastungsventil) zum Zeitpunkt $t = 62$ s kommt es zum raschen Absinken des Druckes und zum Aufschäumen des Wasser-Dampf Gemisches infolge der Verdampfung. Das Schließen des Lecks zum Zeitpunkt $t = 128$ s führt zum Kollabieren des Wasser-Dampf Gemisches. Im Druckbehälter stellt sich ein konstantes Druck- und Füllstandsniveau ein, welches einen neuen Gleichgewichtszustand charakterisiert.

Im Bild 3-3 ist zu erkennen, daß die zeitlichen Verläufe des Massenfüllstandes (Nahbereich) (hm_n) und des Gemischfüllstandes (hg) von einer hohen Dynamik gekennzeichnet sind, besonders in den Phasen des Öffnens und Schließens des Lecks. Weiterhin wird deutlich, daß diese beiden Füllstandsverläufe durch folgende Phasen charakterisiert sind:

- ⇒ rapider Füllstandsanstieg durch Aufschäumen des Wasser-Dampf Gemisches infolge der plötzlichen Druckentlastung und der einsetzenden Verdampfung (Erhöhung des Dampfgehaltes) bei Öffnen des Lecks,

- ⇒ allmählicher Füllstandsabfall durch Ausdampfen in Verbindung mit Massenverlust (gleichzeitig Druckabsenkung und Abkühlung des Gemisches),
- ⇒ rapider Füllstandsabfall durch Kollabieren des Wasser-Dampf Gemisches infolge des Schließens des Lecks.

Der allmähliche Füllstandsabfall bei den Prozeßgrößen Massenfüllstand (Nahbereich) und Gemischfüllstand erfolgt nahezu in gleicher Weise wie die Absenkung des Massenfüllstandes (Weitbereich) (hm_w). Das bedeutet, daß der sich während der Druckentlastung einstellende mittlere Dampfgehalt in den einzelnen Zonen des Druckbehälters nahezu konstant ist. Der Unterschied in der Aufspreizung des Massenfüllstandes (Nahbereich) und des Gemischfüllstandes im Vergleich zum Massenfüllstand (Weitbereich) ist Folge der unterschiedlichen Meßbereiche. Der Massenfüllstand (Nahbereich) zeigt im Gegensatz zum Massenfüllstand (Weitbereich) aufgrund des geringeren Meßbereiches einen Dampfanteil. Der Gemischfüllstand ist eine globale Größe, die über die gesamte Behälterhöhe bestimmt wird, währenddessen der Massenfüllstand (Nahbereich) eine lokale Größe entsprechend des Meßbereiches des Füllstandsmeßsystems (Nahbereich) darstellt.

3.1.3 Signifikante Prozeßparameter und Einflußgrößen

3.1.3.1 Wärmestrom

Durch die plötzliche Druckentlastung tritt aufgrund von Temperaturunterschieden ein Wärmestrom zwischen der Behälterwand und dem Wasser-Dampf Gemisch als Prozeßstörung auf. Während der negativen Transiente wird dem Wasser-Dampf Gemisch von der Behälterwand Wärmeenergie in Form des Wärmestromes \dot{Q} zugeführt. Die Abkühlung des Wasser-Dampf Gemisches infolge des schnellen Druckabfalls führt zu einer Differenz zwischen der Wandtemperatur des Behälters (Speicherung von Wärme durch die höhere Wärmekapazität) und der Temperatur des Wasser-Dampf Gemisches.

Dieser Effekt hat Einfluß auf die Energiebilanz und auf die Ausbildung des Gemischfüllstandes. Abhängig von der Höhe des Füllstandes im Druckbehälter zu Beginn einer plötzlichen Druckentlastung tritt ein unterschiedlich großer Wärmestrom auf, der abhängig ist von der Höhe der Wasserphase, des Gemisches und der reinen Dampfphase, die durch stark differierende Wärmeübergangszahlen charakterisiert sind. Der Wärmestrom wird nach Gleichung (3.1) berechnet:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

Der Wärmestrom ist eine nichtmeßbare, dynamische Prozeßgröße mit einem nichtlinearen Übertragungsverhalten. Die Größe steht im nichtlinearen Modell als Eingangsgröße nicht zur Verfügung. Das Bild 3-4 veranschaulicht das nichtlineare Übertragungsverhalten anhand des maximal erreichten Wärmestromes in Abhängigkeit der maximal erreichten Druckänderungsgeschwindigkeit (dp/dt) während der Experimente 2, 5, 9, (niedriger Parameterbereich, ▲ klein) sowie 1, 4, 8, 10-12 und 14 (hoher Parameterbereich, ◆ groß) [Trai00].

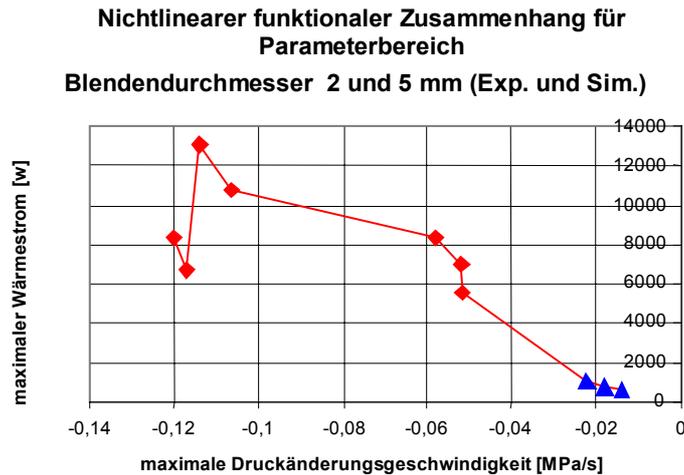


Bild 3-4: Darstellung des funktionalen Zusammenhanges des maximal erreichten Wärmestromes in Abhängigkeit der maximal erreichten Druckänderungsgeschwindigkeit (dp/dt) während der Experimente 1, 2, 4, 5, 8-12 und 14

3.1.3.2 Meßbereichsüberschreitung, Meßbereichsunterschreitung

Eine weitere prozessspezifische Besonderheit ist der Verlust an Meßinformationen infolge Meßbereichsüberschreitungen bzw. Meßbereichsunterschreitungen des Nahbereichsmeßsystems sowie Meßsystemausfall. Dabei treten folgende Problemstellungen hinsichtlich der Verfügbarkeit der Meßinformation auf:

- ⇒ Meßbereichsüberschreitungen,
 - Überschreitung des Meßbereiches des Nahbereichsmeßsystems durch den Gemischfüllstand,
 - Überschreitung des Meßbereiches des Nahbereichsmeßsystems durch den Massenfüllstand (Nahbereich) selbst,
- ⇒ Meßbereichsunterschreitungen,
 - Unterschreitung des Meßbereiches des Nahbereichsmeßsystems durch den Massenfüllstand (Nahbereich) und den Gemischfüllstand,
- ⇒ Meßsystemausfall,
 - Verlust der Prozeßinformation des Nahbereichsmeßsystems und damit Unbrauchbarkeit eines Modells, das auf dieser Größe basiert.

Das Bild 3-5 veranschaulicht die Problematik beispielhaft anhand einer Meßbereichsüberschreitung. Für das Ablaseexperiment 34 (hoher Druckgradient) werden der Verlauf des Massenfüllstandes (Weit - hm_w und Nahbereich - hm_n) und der mit Hilfe der ATHLET-Simulation berechnete Gemischfüllstand (hg) dargestellt. Der Anfangsmassenfüllstand (Weitbereich) vor der Druckentlastung beträgt $h_0 = 1,95$ m (I). Infolge der Drucktransiente kommt es zum Aufschäumen im Druckbehälter, erkennbar an den Verläufen des Massenfüllstandes (Nahbereich) und des Gemischfüllstandes (II). Der Gemischfüllstand überschreitet die Höhe der oberen Einbindung des Füllstandsmeßsystems (Nahbereich) ($h_{0E} = 2,8$ m),

wodurch der Verlauf des gemessenen Massenfüllstandes (Nahbereich) im Zeitraum der Meßbereichsüberschreitung begrenzt wird (erkennbar am konstanten Verlauf des Massenfüllstandes (Nahbereich) im Zeitraum $t \approx 65 \dots 85$ s, III). Während des Ausdampfens tritt der Gemischfüllstand wieder in den Meßbereich des Nahbereichmeßsystems ein, und der Verlauf des Massenfüllstandes (Nahbereich) ist äquivalent zu den anderen Füllstandsverläufen (IV). Am Ende des Abblasevorganges kollabieren durch die Schließung des Lecks der Gemischfüllstand und der Massenfüllstand (Nahbereich) (V). Der hier beschriebene Kurvenverlauf des Massenfüllstandes (Nahbereich) tritt immer qualitativ gleich bei Meßbereichsüber- bzw. Meßbereichsunterschreitungen auf.

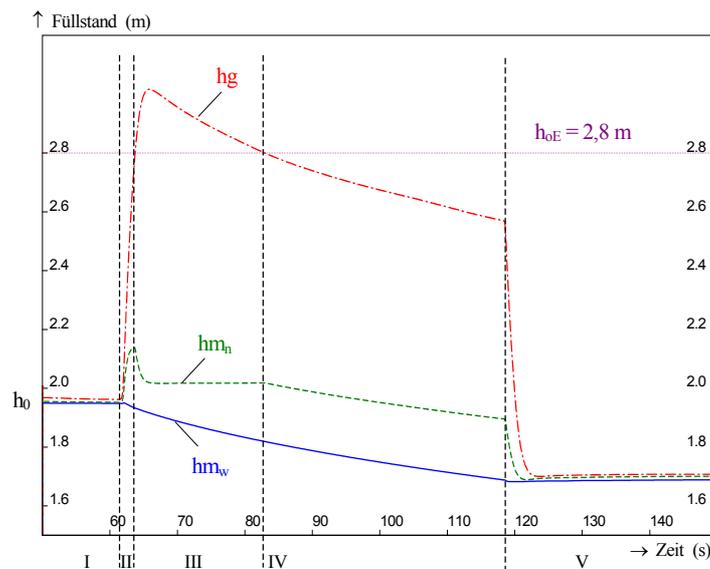


Bild 3-5: Verlauf des Massenfüllstandes (Weitbereich, Nahbereich) (hm_n , hm_w) und des Gemischfüllstandes (hg), Experiment 34

Da der Massenfüllstand (Nahbereich) bei einem klassischen Modell in die Gemischfüllstandsrechnung eingeht, wird ein aus rekonstruierten Zustandsgrößen ermittelter Gemischfüllstand nicht die volle Gemischfüllstandsaufspreizung aufzeigen. Die rekonstruierten Massenfüllstände werden über einen nichtlinearen Beobachter berechnet. Damit erweist sich der Vorteil des Beobachters in Form der Rückkopplung des Rekonstruktionsfehlers, die die Konvergenz der rekonstruierten Zustandsgrößen zum Prozeß sichert, im Falle von Meßbereichsüber- bzw. Meßbereichsunterschreitungen als Nachteil. Um den tatsächlichen Gemischfüllstandsverlauf ermitteln zu können, ist mindestens für den Zeitraum der Meßbereichsüber- bzw. Meßbereichsunterschreitungen (oder eines Ausfalls) vom MMV mit Rückführung (Beobachter) auf ein Verfahren ohne Rückführung (Parallelmodell) umzuschalten.

3.2 Nichtlineare Modellgleichungen

Die analytische Bestimmung des meßbaren und nichtmeßbaren Massenfüllstandes (Nahbereich) und des nichtmeßbaren Gemischfüllstandes wird im folgenden gezeigt. Die Berechnung des Gemischfüllstandes erfolgt nach Gleichung (3.2) aus dem Massenfüllstand hm und dem mittleren Dampfgehalt $\bar{\varphi}$ des Wasser-Dampf Gemisches:

$$hg = \frac{hm}{1 - \bar{\varphi}} \quad (3.2)$$

3.2.1 Erstellung des Zustandsraummodells

Der Druckbehälter wird für die Aufstellung des Zustandsraummodells im einfachsten Fall in zwei Zonen unterteilt (Bild 3-6) [Käst96], wobei davon ausgegangen wird, daß sich der Gemischfüllstand zwischen den Einbindungen des Meßsystems befindet.

- ⇒ Zone i unterhalb der unteren Einbindung des Meßsystems mit der konstanten Zonenhöhe z_i ,
 - Massenfüllstand unterhalb der unteren Einbindung des Meßsystems, charakterisiert durch die nichtmeßbare(n) Zustandsgröße(n) Dampfgehalt φ_i bzw. Massenfüllstand hm_i der Zone i,
- ⇒ Zone zwischen den Einbindungen des Meßsystems (Zone j) mit der veränderlichen Zonenhöhe Δz_j (Wasser- Dampf Gemisch),
 - Massenfüllstand zwischen den Einbindungen des Meßsystems, charakterisiert durch die nichtmeßbare Zustandsgröße Dampfgehalt φ_j und durch die meßbare Zustandsgröße Massenfüllstand hm_j der Zone j.

Die beiden Zonen bilden gleichzeitig die beiden Nodes für die Modellierung des Druckbehälters. Die Nodalisation gestattet eine eindimensionale Betrachtung der thermodynamischen Vorgänge im Druckbehälter und die Rechnung mit Mittelwerten. Die Zustandsrekonstruktion erfordert ein beobachtbares Zustandsraummodell. Für die direkte Bestimmung des nichtmeßbaren Gemischfüllstandes (hg) mittels des nichtmeßbaren Dampfgehaltes φ_j aus der meßbaren Prozeßinformation hm_j ist die Beobachtbarkeit nicht gegeben [Käst96].

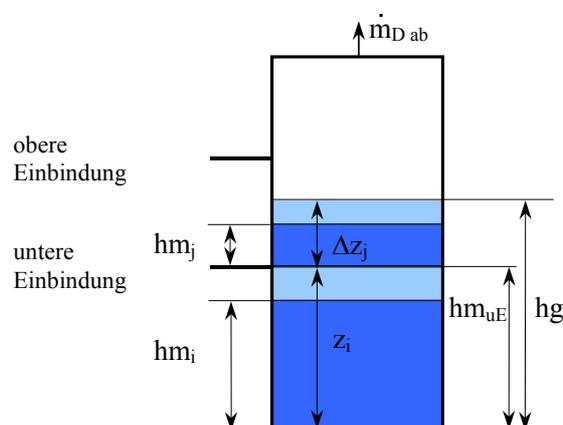


Bild 3-6: Nodalisation des Druckbehälters in zwei Zonen, vereinfachte Darstellung [Hamp99-1]

Ein beobachtbares Zustandsraummodell entsteht nach Gleichung (3.3), wenn mit Hilfe des modellgestützten Meßverfahrens anhand der meßbaren Prozeßinformation hm_j die nichtmeßbare Größe Dampfgehalt im Volumen unterhalb der Einbindung des Meßsystems φ_i rekonstruiert wird.

$$hg = \frac{hm_j(\varphi_i)}{1 - \varphi_j(\varphi_i)} + hm_{uE} \quad (3.3)$$

Der Dampfgehalt φ_i in der Zone mit konstanter Zonenhöhe z_i wird durch den Massenfüllstand hm_i im Node repräsentiert. Es wird davon ausgegangen, daß sich der Gemischfüllstand zwischen den Einbindungen des Meßsystems befindet. Der Algorithmus zur Ermittlung der nichtmeßbaren Zustandsgröße Gemischfüllstand untergliedert sich entsprechend dieser Vorgehensweise in zwei Etappen:

1. Rekonstruktion der nichtmeßbaren Größe Massenfüllstand hm_i im Volumen unterhalb der unteren Einbindung des Meßsystems (repräsentiert den Dampfgehalt φ_i) und der meßbaren Größe Massenfüllstand hm_j zwischen den Einbindungen des Meßsystems,
2. Berechnung des Dampfgehaltes φ_j zwischen den Einbindungen des Meßsystems aus der rekonstruierten Zustandsgröße hm_i und darauf aufbauend Berechnung des Gemischfüllstandes hg mit Gleichung (3.3).

3.2.2 Bilanzgleichungen für den Druckbehälter

Den Ausgangspunkt für die Modellerstellung bilden die Bilanzgleichungen (3.4) und (3.5) für die Masse und Energie des Wasser-Dampf Gemisches im gesamten Druckbehälter [Käst96].

Bilanzgleichung für die Masse des Wasser (') - Dampf (") Gemisches:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho' \cdot V')}{dt} + \frac{d(\rho'' \cdot V'')}{dt} = \sum \dot{m} \quad \text{mit } m = \rho \cdot V \quad (3.4)$$

Bilanzgleichung für die Energie des Wasser- Dampf Gemisches:

$$\frac{dE}{dt} = \sum (\dot{m} \cdot h) + V \cdot \frac{dp}{dt} + \dot{Q} \quad (3.5)$$

Für die einzelnen Zonen i bzw. j des Druckbehälters erfolgt die Bilanzierung der zu- und abströmenden Wasser- bzw. Dampfmassen (\dot{m}_{zu} , \dot{m}_{ab}) sowie des Separationsmassenstromes (\dot{m}_s). In allen Zonen wird eine dem Wasser-Dampf Gemisch zugeführte Leistung $\dot{Q}_{i,j}$ berücksichtigt (Heizelemente bzw. Energieaustausch mit der Behälterwand).

Massenbilanz Wasser:

$$\frac{dm_{W_{i,j}}}{dt} = \dot{m}_{W_{zu_{i,j}}} - \dot{m}_{W_{ab_{i,j}}} - \dot{m}_{S_{i,j}} = \rho' \cdot \frac{dV'_{i,j}}{dt} + V'_{i,j} \cdot \frac{\partial \rho'}{\partial p} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (3.6)$$

Massenbilanz Dampf:

$$\frac{dm_{D_{i,j}}}{dt} = \dot{m}_{Dzu_{i,j}} - \dot{m}_{Dab_{i,j}} + \dot{m}_{S_{i,j}} = \rho'' \cdot \frac{dV_{i,j}''}{dt} + V_{i,j}'' \cdot \frac{\partial \rho''}{\partial p} \cdot \frac{dp}{dt} \quad (3.7)$$

Für $\dot{m}_{S_{i,j}} \geq 0$ gilt:

Energiebilanz Wasser:

$$\begin{aligned} \frac{d(m_{W_{i,j}} \cdot h')}{dt} &= \dot{m}_{Wzu_{i,j}} \cdot h' - \dot{m}_{Wab_{i,j}} \cdot h' - \dot{m}_{S_{i,j}} \cdot h'' + V_{i,j}' \cdot \frac{dp}{dt} + \dot{Q}_{i,j} \\ &= h' \cdot \frac{dm_{W_{i,j}}}{dt} + m_{W_{i,j}} \cdot \frac{\partial h'}{\partial p} \cdot \frac{dp}{dt} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Energiebilanz Dampf:

$$\begin{aligned} \frac{d(m_{D_{i,j}} \cdot h'')}{dt} &= \dot{m}_{Dzu_{i,j}} \cdot h'' - \dot{m}_{Dab_{i,j}} \cdot h'' + \dot{m}_{S_{i,j}} \cdot h'' + V_{i,j}'' \cdot \frac{dp}{dt} + \dot{Q}_{i,j} \\ &= h'' \cdot \frac{dm_{D_{i,j}}}{dt} + m_{D_{i,j}} \cdot \frac{\partial h''}{\partial p} \cdot \frac{dp}{dt} \end{aligned} \quad (3.9)$$

3.2.3 Nichtlineare Differentialgleichungen für den Massenfüllstand

Entsprechend der in [Fens97-1; Hamp94-1; Käst96] beschriebenen Vorgehensweise bei der Modellentwicklung werden aus den Gleichungen (3.6) bis (3.9) die nichtlinearen beschreibenden Differentialgleichungen für den nichtmeßbaren Massenfüllstand der Zone i und den meßbaren Massenfüllstand der Zone j gewonnen [Trai00].

Nichtlineare Differentialgleichung für den Massenfüllstand der Zone i:

$$\begin{aligned} \frac{dhm_i}{dt} &= -w_{i-1}'' + w_i'' + k_{1_{i-1}} \cdot hm_{i-1} - k_{1_i} \cdot hm_i + k_2 \cdot hm_{i-1} \cdot \frac{dp}{dt} + \\ &\quad - (2 \cdot k_2 + k_3) \cdot hm_i \cdot \frac{dp}{dt} + k_2 \cdot (2 \cdot z_i - z_{i-1}) \cdot \frac{dp}{dt} - k_4 \cdot \dot{Q}_i \end{aligned} \quad (3.10)$$

mit den Koeffizienten

$$k_{1_{i-1}} = \frac{w_{i-1}''}{z_{i-1}} \quad (3.11)$$

$$k_{1_i} = \frac{w_i''}{z_i} \quad (3.12)$$

$$k_2 = \frac{1}{\rho''} \cdot \frac{\partial \rho''}{\partial p} \quad (3.13)$$

$$k_3 = \frac{\left(1 - \rho' \cdot \frac{\partial h'}{\partial p}\right)}{\rho'' \cdot (h'' - h')} \quad (3.14)$$

$$k_4 = \frac{1}{\rho'' \cdot A \cdot (h'' - h')} \quad (3.15)$$

Nichtlineare Differentialgleichung für den Massenfüllstand der Zone j:

$$\begin{aligned} \frac{dh_{m,j}}{dt} = & -w''_{i=k} + (k_6 + k_7) \cdot \sum_{i=1}^k hm_i \cdot \frac{dp}{dt} + k_{i=k} \cdot hm_{i=k} + k_2 \cdot hm_{i=k} \cdot \frac{dp}{dt} + \\ & -k_8 \cdot hm_j \cdot \frac{dp}{dt} - k_2 \cdot \left(\sum_{i=1}^k z_i + z_{i=k}\right) \cdot \frac{dp}{dt} + (k_4 - k_5) \cdot \sum_{i=1}^k \dot{Q}_i - k_5 \cdot \dot{Q}_j \end{aligned} \quad (3.16)$$

mit den Koeffizienten

$$k_5 = \frac{1}{\rho' \cdot A \cdot (h'' - h')} \quad (3.17)$$

$$k_6 = \left(\frac{1}{\rho''} - \frac{1}{\rho'}\right) \cdot \frac{\left(1 - \rho' \cdot \frac{\partial h'}{\partial p}\right)}{(h'' - h')} \quad (3.18)$$

$$k_7 = \frac{1}{\rho''} \cdot \frac{\partial \rho''}{\partial p} - \frac{1}{\rho'} \cdot \frac{\partial \rho'}{\partial p} \quad (3.19)$$

$$k_8 = \frac{1}{\rho'} \cdot \frac{\partial \rho'}{\partial p} + \frac{\left(1 - \rho' \cdot \frac{\partial h'}{\partial p}\right)}{\rho' \cdot (h'' - h')} \quad (3.20)$$

3.2.4 Nichtlineare Zustandsgleichungen (Parallelmodell)

Entsprechend für die in Abschnitt 3.2.1 vorgestellte Nodalierungsvariante wird mit der Verwendung der Indizes 1, 2 (Annahme von zwei Zonen: Zone 1 unterhalb der unteren Einbindung des Meßsystems, Zone 2 oberhalb dessen, siehe Bild 3-6) das vereinfachte, robuste nodale Gemischraummodell mit den nichtlinearen Zustandsgleichungen (3.21 bis 3.23) definiert, welches im folgenden als nichtlineares, analytisches Parallelmodell ohne Rückkopplung (Fehlerrückführung) verwendet wird.

Zustandsdifferentialgleichungssystem mit zwei DGL 1. Ordnung:

$$\text{Zone 1: } \frac{d\text{hm}_1}{dt} = w_1'' - k_1 \cdot \text{hm}_1 - (2k_2 + k_3) \cdot \text{hm}_1 \cdot \frac{dp}{dt} + k_2 \cdot 2z_1 \cdot \frac{dp}{dt} - k_4 \cdot \dot{Q}_1 \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} \text{Zone 2: } \frac{d\text{hm}_2}{dt} = & -w_1'' + k_1 \cdot \text{hm}_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot \text{hm}_1 \cdot \frac{dp}{dt} - k_2 \cdot 2z_1 \cdot \frac{dp}{dt} - k_8 \cdot \text{hm}_2 \cdot \frac{dp}{dt} + \\ & - k_5 \cdot \dot{Q}_2 + (k_4 - k_5) \cdot \dot{Q}_1 \end{aligned} \quad (3.22)$$

Meßgleichung:

$$y = \text{hm}_2 \quad (3.23)$$

mit

- hm_1 - Massenfüllstand Zone 1, nichtmeßbare Zustandsgröße
- hm_2 - Massenfüllstand Zone 2, meßbare Zustandsgröße (Ausgangsgröße)
- $p, dp/dt$ - Druck, Druckänderungsgeschwindigkeit, meßbare Eingangsgrößen
- \dot{Q}_1, \dot{Q}_2 - Wärmestrom zwischen Behälterwand und Wasser-Dampf Gemisch in den Zonen 1 bzw. 2, nichtmeßbare Eingangsgrößen
- w_1'' - Dampfblasengeschwindigkeit in Zone 1
- k_{1-8} - nichtlineare Koeffizienten (Abhängigkeit vom Druck)

Der physikalische Parameter Dampfblasengeschwindigkeit wird nach [Käst96] in einer Näherung als halbempirische Funktion des aktuellen Drucks und Dampfgehaltes in der Zone 1 (repräsentiert durch den Massenfüllstand Zone 1 hm_1) berechnet. Die nichtlinearen Modellgleichungen besitzen integrales Verhalten, es gibt keine Rückkopplung von Zone 2 auf die Zone 1, die die Kompensation von Fehlern ermöglicht.

3.3 Ergebnisse der Zustandsrekonstruktion mittels nichtlinearem Parallelmodell

Das entworfene nichtlineare Parallelmodell wird als erstes modellgestütztes Meßverfahren auf Eignung zur Zustandsrekonstruktion des meßbaren und nichtmeßbaren Massenfüllstandes (Nahbereich) getestet (Nachweis der Beobachtbarkeit: Anhang A 2.1). Im Bild 3-7 sind die Ergebnisse der Simulation des nichtlinearen Parallelmodells (nodaales Gemischraummodell) zur Bestimmung der Füllstände Zone 1 und 2 (hm_{1_PM} , hm_{2_PM}) für das Experiment 5 (kleiner Druckgradient) dargestellt. Das Modell wurde mit DynStar simuliert, das entspre-

chende Programm steht im Anhang A 3.1. Im Vergleich dazu sind die Füllstandsverläufe des Prozesses (hm_1_ATH , hm_2_ATH) dargestellt, die dem Vergleichsprozeß (ATHLET-Code) entnommen wurden. Die nichtmeßbaren Größen \dot{Q}_1, \dot{Q}_2 (Wärmestrom in beiden Zonen) stehen als nichtmeßbare Größe dem Modell nicht zur Verfügung.

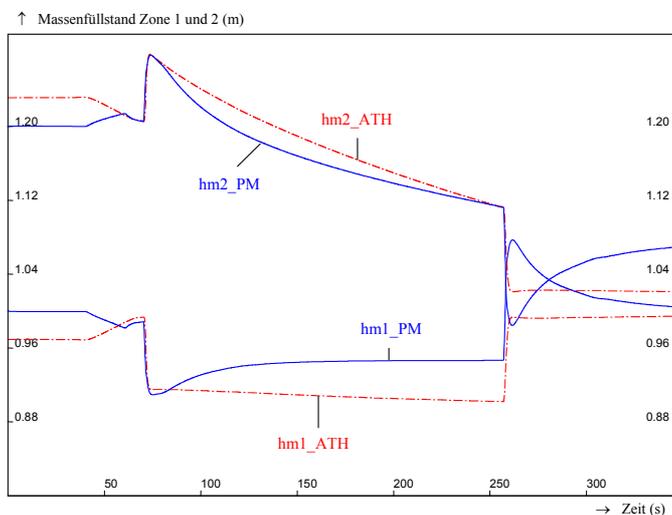


Bild 3-7: Darstellung der Zeitverläufe des Massenfüllstandes Zone 1 (hm_1_ATH) und Zone 2 (hm_2_ATH) für das Experiment 5 sowie die dazugehörigen Zeitverläufe, berechnet mit dem nichtlinearen Parallelmodell (hm_1_PM , hm_2_PM)

Das nodale Gemischraummodell gibt über den gesamten Beobachtungszeitraum den Verlauf der Füllstände qualitativ richtig wieder. Die Abweichung der nichtmeßbaren Zustandsgröße Zone 1 hm_1_PM während des Abblasen ist als zu hoch einzuschätzen (im Maximum ca. 4.5 cm Füllstandsabweichung bezogen auf den Prozeß hm_1_ATH). Ein weiterer Mangel ist die bleibende Abweichung nach Erreichen des stationären Zustandes sowie das hohe Überschwingen beider berechneter Größen nach dem Schließen des Lecks. Die Abweichungen sind im Wesentlichen auf die fehlende Modellierung des Wärmestroms \dot{Q}_1, \dot{Q}_2 zwischen Behälterwand und Wasser-Dampf Gemisch in beiden Zonen zurückzuführen. Da die Forderung nach der genauen Bestimmung des nichtmeßbaren Massenfüllstandes steht, ist die Simulation mittels nichtlinearem Parallelmodell im Ergebnis als unbefriedigend einzustufen.

Der große Einfluß der Wärmeströme auf die Energiebilanz und damit das Rekonstruktionsergebnis ist im Bild 3-8 für das Experiment 46 (hoher Bereich) noch deutlicher zu erkennen. Durch die hohe Druckänderungsgeschwindigkeit und damit schnellere Abkühlung des Wasser-Dampf Gemisches fließt ein höherer Wärmestrom, was zu höheren Abweichungen in der Rekonstruktion der nichtmeßbaren Zustandsgröße hm_1_PM führt (im Maximum ca. 9 cm bezogen auf den Prozeß hm_1_ATH während des Abblasens).

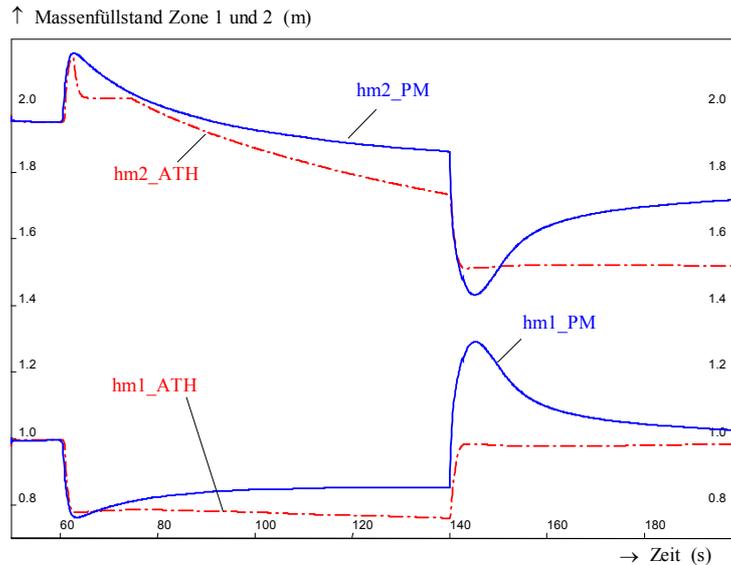


Bild 3-8: Darstellung der Zeitverläufe des Massenfüllstandes Zone 1 (hm_1_ATH) und Zone 2 (hm_2_ATH) für das Experiment 46 sowie die dazugehörigen Zeitverläufe, berechnet mit dem nichtlinearen Parallelmodell (hm_1_PM , hm_2_PM)

Dieses Experiment ist außerdem noch durch eine Meßbereichsüberschreitung der oberen Grenze ($h_{oE} = 2,8$ m) durch den Gemischfüllstand gekennzeichnet, was an der Limitierung der Meßgröße Massenfüllstand Zone 2 im Zeitraum $t = 60 \dots 75$ s zu sehen ist. Da das Parallelmodell auf der Berechnung aus der globalen Eingangsgröße Druckänderungsgeschwindigkeit beruht, werden auch der Füllstand als globale Größe ohne Einschränkung durch die obere Meßbereichsgrenze und nicht der real gemessene Verlauf rekonstruiert. Die Abweichungen im Verlauf und nach der Transiente sind für beide rekonstruierte Zustandsgrößen als zu hoch einzuschätzen (67 % bezogen auf die Aufspreizung in cm zum Anfangswert, Ausgangszustand vor der Transiente). Mit den vorangegangenen Untersuchungen ist die Notwendigkeit begründet, den Wärmestrom Behälterwand \Rightarrow Wasser-Dampf Gemisch in das Modell zu integrieren.

3.4 Definition der Nichtlinearitäten und Unschärfen

Die Nichtlinearitäten und Unschärfen im vorliegenden Prozeß können wie folgt klassifiziert werden:

- \Rightarrow strukturelle Nichtlinearitäten des Modellansatzes, d. h. Multiplikation/Division von zeitveränderlichen Größen in Form von Zustandsgrößen oder/und Eingangsgrößen der Zustandsgleichungen,
 - Produkt von Zustandsgröße Massenfüllstand hm und Eingangsgröße Druckänderungsgeschwindigkeit dp/dt ,
- \Rightarrow nichtlineare Koeffizienten des Modellansatzes (nichtlineare Änderung der thermodynamischen Stoffdaten),
 - Abhängigkeit der Dichte und der Enthalpie vom Druck in den Koeffizienten $k_{1..8}$,

- ⇒ Nichtlinearitäten infolge der Änderung des Prozeßzustandes (Normalbetrieb, negative Drucktransiente),
 - Abblasen (Dampfmassenstrom \dot{m}_{Dab}), Wärmestrom,
- ⇒ Einschränkungen durch:
 - Überschreitung bzw. Unterschreitung des Meßbereiches,
 - Verlust der Meßinformation durch Meßsystemausfall.

3.5 Schlußfolgerungen

Für die genannten Problemstellungen müssen zur Erfüllung der Zielsetzung die geeigneten Entwurfsverfahren für modellgestützte Meßverfahren in Form von nichtlinearen Beobachtern oder nichtlinearen Parallelmodellen gefunden werden. Aus diesem Grund werden folgende Verfahren zur modellbasierten Füllstandsbestimmung entwickelt und verifiziert:

- ⇒ klassischer nichtlinearer PI-Arbeitspunktbeobachter (Abschnitt 4.1),
 - Bestimmung des Massenfüllstandes (Nahbereich),
- ⇒ neuer hybrider nichtlinearer PI-Arbeitspunkt-Beobachter (Abschnitt 4.2),
 - Bestimmung des Massenfüllstandes (Nahbereich) mit einer Erweiterung um eine fuzzy-basierte Adaption des Wärmestroms Zone 1 und 2,
- ⇒ neue fuzzy-basierte Parallelmodelle (Kapitel 5) zur Erweiterung des Gültigkeitsbereiches bei Meßbereichsüberschreitungen,
 - Bestimmung des meßbaren Massenfüllstandes (Nahbereich) und des Gemischfüllstandes.

4 Nichtlineare Beobachter zur Bestimmung des Füllstandes

4.1 Klassische nichtlineare Beobachter

4.1.1 Formulierung der nichtlinearen Beobachtungsaufgabe

Dieses Verfahren der analytischen Redundanz (klassisches nichtlineares Entwurfsverfahren für nichtlineare Beobachter) dient im Rahmen der Modellierung des Füllstandes im Druckbehälter der Erstellung von analytischen Basisstrukturen. Die unter Abschnitt 3.2 beschriebenen Zustandsdifferentialgleichungen (3.21) und (3.22) enthalten eine Multiplikation von zwei zeitveränderlichen Größen, jeweils der meßbaren und der nichtmeßbaren Zustandsgröße mit der Eingangsgröße. Für diese Art der Nichtlinearität muß ein Beobachterentwurfsverfahren gefunden werden. Häufig treten durch die multiplikative Verknüpfung bei dem Beobachterentwurf zeitliche Ableitungen der Eingangsgröße auf, die sich nur in wenigen Fällen kompensieren lassen [Fens97-1]. Eine tabellarische Zusammenstellung zu nichtlinearen klassischen Beobachterentwurfsverfahren und der Anwendbarkeit ist in [Fens97-1] vorgenommen worden. Es werden zwei ausgewählte Entwurfsverfahren für nichtlineare Beobachter als Entwurfsmöglichkeit analysiert, die die zeitlichen Ableitungen berücksichtigen:

⇒ **Verfahren 1:** Berechnung eines streng nichtlinearen Normalformbeobachters nach [Kell86-1, 2]

⇒ **Verfahren 2:** klassischer nichtlinearer PI-Arbeitspunkt-Beobachter

Zunächst erfolgt die Formulierung der nichtlinearen Beobachtungsaufgabe und der Dimensionierung des Verstärkungsterms, was für beide Verfahren gültig ist. Verfahren 1 dient dabei dem Nachweis der Beobachtbarkeit des Modells. Die Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen des Beobachtermodells werden den physikalischen Größen den nichtlinearen Zustandsraumgleichungen (3.21) bis (3.23) entsprechend der Beziehungen (4.1) zugeordnet. Dabei erhält die Eingangsgröße des Modells, die Druckänderungsgeschwindigkeit, die Bezeichnung u_1 .

Definition der Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen für das nodale Gemischraummodell:

$$\frac{dp}{dt} \hat{=} u_1; \quad hm_1 \hat{=} x_1; \quad hm_2 \hat{=} x_2; \quad \dot{Q}_1 \hat{=} u_2; \quad \dot{Q}_2 \hat{=} u_3 \quad (4.1)$$

Die nichtlinearen Zustandsgleichungen ergeben sich für die zu lösende Beobachtungsaufgabe mit $x(t_0) = x_0$ zu:

Zustandsdifferentialgleichungssystem und Meßgleichung:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1'' - k_1 \cdot x_1 - k_a \cdot x_1 \cdot u_1 + k_b \cdot u_1 - k_4 \cdot u_2 \\ -w_1'' + k_1 \cdot x_1 + k_c \cdot x_1 \cdot u_1 - k_b \cdot u_1 + \\ -k_8 \cdot x_2 \cdot u_1 - k_5 \cdot u_3 + k_d \cdot u_2 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$y = x_2$$

$$\begin{array}{lll} \text{mit} & -\infty \leq u_1 \leq \infty & \text{und} & k_a = 2 \cdot k_2 + k_3 \\ & 0 < x_1 \leq z_1 & & k_b = k_2 \cdot 2 \cdot z_1 \\ & 0 < x_2 \leq h_{oE} & & k_c = k_6 + k_7 + k_2 \\ & & & k_d = k_4 - k_5 \end{array} \quad (4.3)$$

Die Wärmeströme \dot{Q}_1 und \dot{Q}_2 werden im Modell als Prozeßgrößen interpretiert. Die Wärmeströme der Zonen 1 und 2 stehen dem Zustandsraum- und dem Beobachtermodell nicht als meßbare Prozeßgrößen, bezeichnet als u_2 und u_3 , zur Verfügung. Eine analytische Bestimmung des Wärmestromes setzt das Wärmeübertragungsmodell voraus. In diesem ist die nichtmeßbare Größe Temperatur der Behälterwand zu berechnen. Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Behälterwand und Wasser-Dampf Gemisch wird meist aus empirischen oder halbempirischen Gleichungen ermittelt, die nur für bestimmte Randbedingungen hinsichtlich der Geometrie und Strömungsform gelten. Das würde die Erweiterung des Zustandsraummodells um die Gleichungen zur Wärmestromermittlung und eine Erweiterung der Meßgleichung um die Wassertemperatur beinhalten (System höherer Ordnung). Aufgrund der Überschaubarkeit und Robustheit wird das nodale Gemischraummodell beibehalten und mit dem Beobachter versucht, die vorhandenen Modellungenauigkeiten weitgehend zu kompensieren.

4.1.2 Dimensionierung der Verstärkungsmatrix

Eine weitere Aufgabe beim Beobachterentwurf besteht in der Dimensionierung der Verstärkungsmatrix, hier für das Zustandsdifferentialgleichungssystem mit zwei Differenzialgleichungen 1. Ordnung als Matrix mit zwei Elementen. Dazu werden die nichtlinearen Differentialgleichungen in einem Arbeitspunkt linearisiert und die Eigenwerte der Systemmatrix berechnet. Ausgehend vom Polvorgabeverfahren wird die Verstärkungsmatrix für das nichtlineare System bestimmt [Fens97-1, 97-3]:

$$(s - \lambda_1) \cdot (s - \lambda_2) = s^2 - s \cdot \underbrace{(\lambda_1 + \lambda_2)}_{K_1} + \underbrace{\lambda_1 \cdot \lambda_2}_{K_0} \quad (4.4)$$

Die Simulationen mit betragsmäßig gleichen Matrixelementen, die anhand der Eigenwerte bestimmt werden, lieferten für den nichtlinearen Beobachter die beste Güte im gesamten betrachteten Parameterbereich und führten zu der Bedingung $|K_0| \equiv |K_1|$ und $K_0 < 0, K_1 > 0$ [Fens97-1; Käst96]:

$$K = \begin{bmatrix} K_0 \\ K_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10.0 \\ 10.0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

4.1.3 Streng Nichtlinearer Normalformbeobachter

Der klassische, Streng Nichtlineare Normalformbeobachter [Kell86-1, 2] stellt eine Entwurfsmethodik unter Verwendung kanonischer Formen dar. Genutzt werden dabei nichtlineare Transformationen, die in zwei Schritten durchgeführt werden [Fens93, 97-1; Kell86-1, 2]. Im ersten Schritt werden die Zustandsgleichungen in die Nichtlineare Beobachtbarkeitsnormalform (NBKNF) transformiert. Bei Existenz der NBKNF ist die Beobachtbarkeit des Systems im betrachteten physikalischen Gebiet gewährleistet. Im zweiten Schritt erfolgt die Transformation auf die Nichtlineare Beobachternormalform (NBNF) und damit der Entwurf des Beobachters. Der Vorteil des mittels Normalformen entworfenen Beobachters besteht in der Verwendung bzw. Separation einer linearen Fehlerdifferentialgleichung und des nichtlinearen Streckenmodells sowie einer nichtlinearen Rückführung.

Für das betrachtete Druckbehältermodell wurde die Existenz der NBKNF nachgewiesen und damit die Beobachtbarkeit des Modells im großen nach [Kell86-1] gesichert. Für die Zustandsgrößen und Eingangsgrößen sind alle Werte im physikalisch sinnvollen Bereich in die NBKNF einsetzbar. Die mathematische Dokumentation ist in Anhang A 2 enthalten. Die Transformation auf die zweite Normalform (NBNF) konnte nicht vollständig durchgeführt werden, da die Separation der linearen Fehlerdifferentialgleichung nicht gelang, obwohl bei dieser Methodik die zeitlichen Ableitungen der Eingangsgröße einbezogen werden können [Fens97-1]. Das Streckenmodell konnte nach den Transformationen bei beiden Zustandsgrößen separiert werden, was die Aussage unterstützt, daß der nichtlineare Beobachter immer aus Streckenmodell und Korrekturterm besteht.

Infolge der nicht erzielten Separation der linearen Fehlerdifferentialgleichung ist dieser Beobachterentwurf unvollständig und es wird auf eine einfacher zu dimensionierende Variante eines nichtlinearen Beobacherverfahrens zurückgegriffen. Dieses ist der klassische nichtlineare Arbeitspunkt-Beobachter [Birk92; Buch94; Seid81; Zimm97]. Der nichtlineare Arbeitspunkt-Beobachter dient wegen seiner überschaubaren Struktur im weiteren als analytisches Basis-MMV für die neu entwickelten hybriden MMV.

4.1.4 Nichtlinearer PI-Arbeitspunkt-Beobachter

Der nichtlineare Arbeitspunkt-Beobachter besteht aus dem nichtlinearen Streckenmodell und einem Verstärkungsterm mit linearer Fehlerrückführung, der wie bei linearen Systemen dimensioniert wird:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= \underbrace{f(\hat{x}, u, t)}_{\text{nichtlineares Streckenmodell}} + \underbrace{K(y - \hat{y})}_{\text{Verstärkungsterm mit linearer Fehlerrückführung}} \\ \hat{y} &= h(\hat{x}, u, t) \\ \text{mit } \hat{x}(t_0) &= \hat{x}_0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Um eine hohe Rekonstruktionsgüte zu erhalten, wird ein sogenannter PI-Beobachter [Alva99; Käst96] generiert, der eine Rückführung des Fehlers außer über den proportionalen zusätzlich über einen integralen Anteil ermöglicht. Der Vergleich der Rekonstruktionsgüte zu ausgewählten Experimenten sowie die Sensibilitätsanalyse auch hinsichtlich der Dimensionierung der Verstärkungsmatrix ist ausführlich in [Fens97-1] dokumentiert.

Für die Zustandsgleichungen entsprechend der Gleichungen (4.2) wurde auf der Basis von Gleichung (4.6) der in den Gleichungen (4.7) bis (4.9) dargestellte nichtlineare PI-Arbeitspunkt-Beobachter entworfen. Der Verstärkungsterm besteht aus dem proportionalen Anteil (K_{0p}) und dem integralen Anteil (K_{0i}) [Trai00].

$$\dot{\hat{x}}_1 = w_1'' - k_1 \cdot \hat{x}_1 - k_a \cdot \hat{x}_1 \cdot u_1 + k_b \cdot u_1 - k_4 \cdot u_2 + K_{0p} \cdot (y - \hat{x}_2) + K_{0i} \cdot \int (y - \hat{x}_2) dt \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_2 &= -w_1'' + k_1 \cdot \hat{x}_1 + k_c \cdot \hat{x}_1 \cdot u_1 - k_b \cdot u_1 - k_8 \cdot \hat{x}_2 \cdot u_1 - k_5 \cdot u_3 + k_d \cdot u_2 + \\ &+ K_{1p} \cdot (y - \hat{x}_2) + K_{1i} \cdot \int (y - \hat{x}_2) dt \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\hat{y} = \hat{x}_2 \quad (4.9)$$

Die Dimensionierung der Verstärkung für den proportionalen und integralen Anteil wird entsprechend Gleichung (4.5) folgendermaßen festgelegt:

$$K = \begin{bmatrix} K_{0p} \\ K_{1p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{0i} \\ K_{1i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10.0 \\ 10.0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

4.1.5 Ergebnisse der Simulation mittels nichtlinearem PI-Arbeitspunkt-Beobachter

Im Bild 4-1 werden die Ergebnisse der Simulation eines Abblaseexperimentes an der Versuchsanlage (hm₂_ATH, hm₁_ATH) den Simulationsergebnissen des klassischen nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachters (hm₂_nl_BEO, hm₁_nl_BEO) gegenübergestellt. Gleichzeitig wird ein Vergleich zu der Rekonstruktionsgüte gezogen, die mit einem linearen klassischen Luenberger PI-Beobachter entsprechend [Käst96] (hm₂_l_BEO, hm₁_l_BEO) erreicht wurde. Es sind die meßbaren und nichtmeßbaren Zustandsgrößen Massenfüllstand Zone 2 und 1 für das Experiment 5 (kleiner Druckgradient) dargestellt [Trai00].

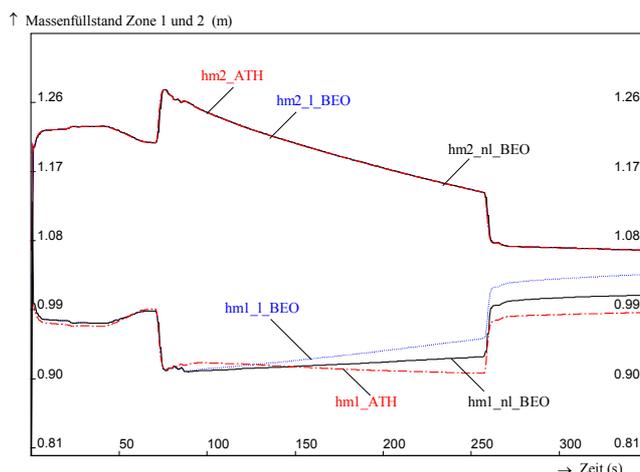


Bild 4-1: Zeitlicher Verlauf der Zustandsgrößen (Massenfüllstand Zone 1 und 2, hm) für den Prozeß (ATH), den nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachter (nl_BEO) und den linearen PI-Beobachter (l_BEO), Experiment 5

Der nichtlineare Arbeitspunkt-Beobachter erreicht über den gesamten Beobachtungszeitraum eine bessere Konvergenz zum Prozeß gegenüber dem linearen PI-Beobachter. Die Abweichung der nichtmeßbaren Zustandsgröße hm_1 liegt für den stationären Endzustand in der Größenordnung von ca. 2 cm. Das entspricht, bezogen auf die Aufspreizung, einem Fehler von 25 %. Bei dem linearen klassischen Luenberger PI-Beobachter ergibt sich für das Experiment bei dieser niedrigen Druckänderungsgeschwindigkeit eine unzulässige Abweichung von ca. 4,5 cm (über 50 %) für den nichtmeßbaren Massenfüllstand in Zone 1.

Der Einfluß der unbekanntem Wärmeströme auf die Rekonstruktionsgüte des PI-Arbeitspunkt-Beobachters während des Druckentlastungsvorganges wird hier deutlich. Die Nichtlinearitäten im Verlauf des dynamischen Prozesses können durch das nichtlineare Beobachtermodell ohne Wärmeströme nicht vollständig kompensiert werden. Es bleibt eine steigende Divergenz der rekonstruierten nichtmeßbaren Zustandsgröße hm_1_BEO zum Prozeß.

Deutlich wird das vor allem in Bild 4-2 und Bild 4-3, welche das Rekonstruktionsergebnis des klassischen nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachters für die Zustandsgrößen Massenfüllstand der Zonen 1 und 2 im Vergleich zu Ergebnissen für die Experimente 8 und 46 (hoher Druckgradient) darstellen. Für beide Simulationen wird für die meßbare Zustandsgröße die Übereinstimmung erreicht, währenddessen für die nichtmeßbare Zustandsgröße eine hohe Abweichung von mehreren Zentimetern entsteht. Das ist darauf zurückzuführen, daß bei Experimenten mit der großen Blende eine höhere Druckänderungsgeschwindigkeit aufgrund des größeren Lecks entsteht. Durch die schnellere Abkühlung und damit größere Temperaturdifferenz fließt ein höherer Wärmestrom, der im Verlauf der Transiente einen größeren Einfluß auf die Energiebilanz hat.

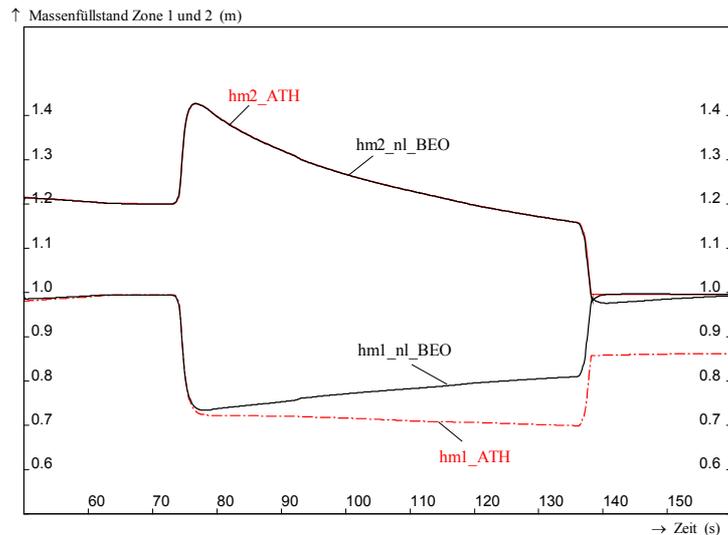


Bild 4-2: Zeitlicher Verlauf der Zustandsgrößen (Massenfüllstand der Zonen 1 und 2, hm) von Prozeß (ATH) und nichtlinearem PI-Arbeitspunkt-Beobachter (BEO) für das Experiment 8

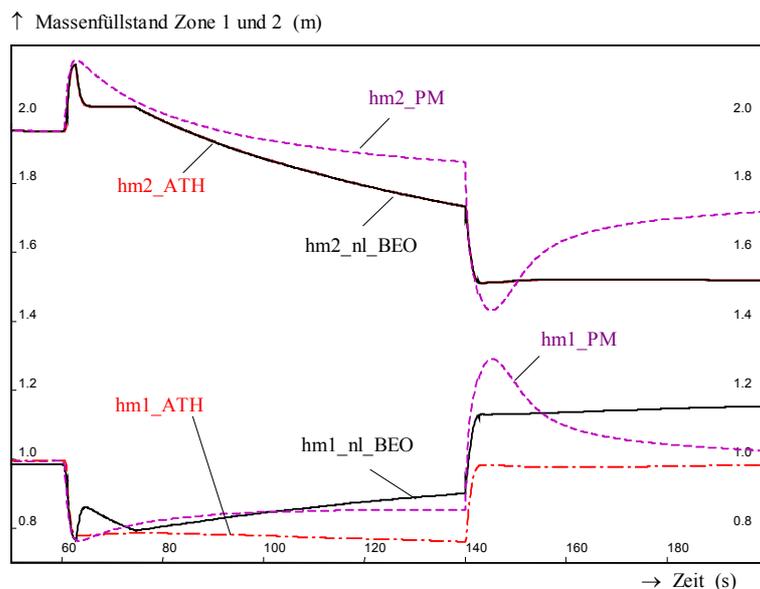


Bild 4-3: Zeitlicher Verlauf der Zustandsgrößen (hm_1 , hm_2) von Prozeß (ATH), nichtlinearem PI-Arbeitspunkt-Beobachter (BEO) und nichtlinearem Parallelmodell (PM) für das Experiment 46

Im Bild 4-3 ist zusätzlich noch das Ergebnis der Rekonstruktion mit dem nichtlinearen Parallelmodell im Vergleich zu dem Ergebnis, welches mit dem klassischen nichtlinearen Beobachter erreicht wurde, dargestellt. Wie bereits unter Abschnitt 3.1.3.2 beschrieben, ist das Experiment 46 durch eine Meßbereichsunterschreitung gekennzeichnet. Der klassische Beobachter erzielt die Übereinstimmung zur Anzeige des Massenfüllstandsystems hm_2 , was sich durch die Rückkopplung des Fehlers auf die Rekonstruktion der nichtmeßbaren Zustandsgröße auswirkt. Infolge dessen wird das Aufschäumen des Gemischfüllstandes nicht exakt berechnet. Das Parallelmodell gibt den Wert beim Aufschäumen besser, aber den Verlauf der Transiente nicht genau wider. Die bleibenden Abweichungen sind beim Parallel-

modell und beim klassischen Beobachter aufgrund des hohen Einflusses des Wärmestroms zu groß. Der Fehler für den Beobachter beträgt 75 %, bezogen auf die Aufspreizung bei der nichtmeßbaren Zustandsgröße. Das heißt, daß sowohl Alternativen zum klassischen nichtlinearen Beobachter mit Berücksichtigung des Wärmestroms, als auch zum nichtlinearen Parallelmodell im Falle von Meßbereichsüber- oder -unterschreitungen zu entwickeln sind.

4.1.6 Schlußfolgerungen

Für den Einsatz des klassischen nichtlinearen Arbeitspunkt-Beobachters werden folgende Schlußfolgerungen gezogen:

- ⇒ Die Anwendung des klassischen nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachters ist für die Beobachtung des Füllstandes im Druckbehälter gerechtfertigt.
- ⇒ Der klassische nichtlineare Beobachter weist eine sehr gute Rekonstruktion der meßbaren Zustandsgröße Massenfüllstand Zone 2 auf.
- ⇒ Für die nichtmeßbare Zustandsgröße Zone 1 werden zu hohe Abweichungen zum Prozeß erzielt.

Aufgrund der Abweichungen für die nichtmeßbare Zustandsgröße ist es erforderlich, das nichtlineare Modell weiterzuentwickeln, um die Übereinstimmung von Modell und Prozeß hinsichtlich der nichtmeßbaren Zustandsgröße zu gewährleisten. Für die Verbesserung der Rekonstruktionsgüte wird im nächsten Abschnitt der neue hybride nichtlineare PI-Arbeitspunkt-Beobachter mittels Beschreibung der nichtmeßbaren Eingangsgröße Wärmestrom mit fuzzy-basierten Algorithmen zum Einsatz gebracht.

4.2 Neuer hybrider nichtlinearer PI-Arbeitspunkt-Beobachter

4.2.1 Struktur

Die Erweiterung des Gültigkeitsbereiches des klassischen nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachters wird durch eine fuzzy-basierte Adaption auf der Grundlage des vorhandenen Erfahrungs- und Expertenwissens von nichtmeßbaren physikalischen Parametern wie dem Wärmestrom erreicht. Das klassische nichtlineare Beobachterbasismodell wird somit allgemein um eine fuzzy-basierte Beschreibung der nichtmeßbaren Eingangsgrößen zu einem Hybridmodell erweitert. Die generelle Struktur des daraus resultierenden neuen hybriden nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachters mit konstanter Verstärkungsmatrix, der sich auch für höherdimensionale Modelle eignet, ist im Bild 4-4 veranschaulicht.

Der Beobachteralgorithmus ist charakterisiert durch:

- ⇒ ein nichtlineares Prozeßmodell für den Beobachteransatz,
- ⇒ eine konstante Verstärkungsmatrix K , aufgeteilt in einen linearen und integralen Anteil (K_P und K_I),
- ⇒ eine fuzzy-basierte Adaption von Parametern, die als Eingangsgrößen des Beobachtermodells definiert sind.

Für den Parameter Wärmestrom wird speziell das entwickelte Fuzzy-Modell mit externer Dynamik (Abschnitt 2.2.2) qualifiziert und in den nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachter (Abschnitt 4.1) implementiert. Die Vorteile des Hybridverfahrens werden anhand des Vergleiches der Rekonstruktionsergebnisse mit dem klassischen nichtlinearen modellgestützten Meßverfahren (nichtlinearer PI-Arbeitspunkt-Beobachter) demonstriert. Die Güte der Rekonstruktion der Zustandsgrößen für den vorliegenden Prozeß (Massenfüllstand Zone 1 und 2) wird durch die Anwendung des Hybridverfahrens maßgeblich erhöht (Abschnitt 4.2.3).

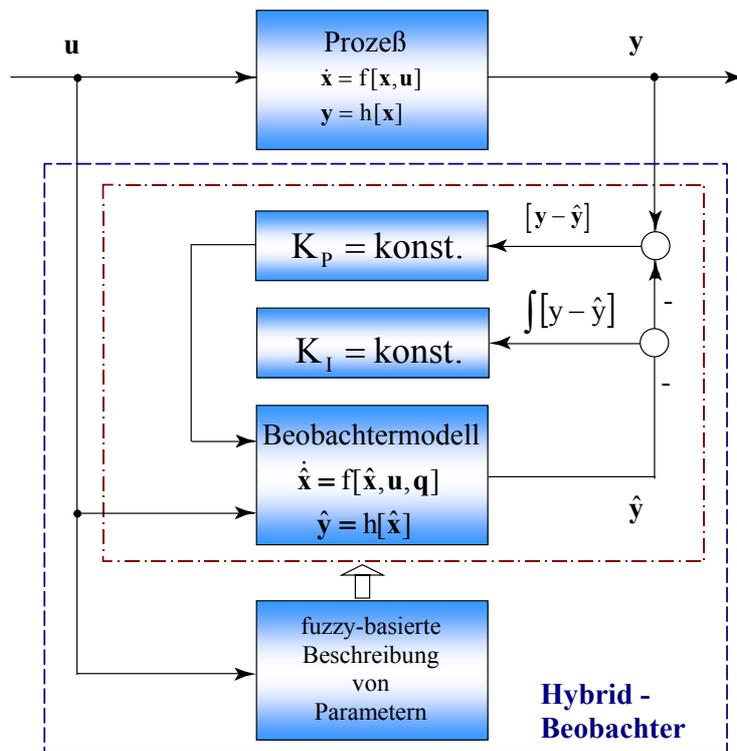


Bild 4-4: Generelle Grundstruktur des hybriden nichtlinearen PI-Arbeitspunkt [Hamp00]

Tabelle 4-1: Erläuterung der Modell- und Prozeßgrößen entsprechend der Spezifik des Anwendungsbeispiels

u	Eingangsgrößen	Druckänderungsgeschwindigkeit, Anfangsdruck
x	Zustandsgrößen	Massenfüllstand (Nahbereich) Zone 1, 2
y	Ausgangsgrößen	Massenfüllstand (Nahbereich) Zone 2
fuzzy-basierte Beschreibung von Parametern	Prozeßgröße	Wärmestrom (Zone 1, 2)

Tabelle 4-1 zeigt noch einmal die konkrete Bezeichnung der Größen und Parameter des Hybridbeobachters aus Bild 4-4 entsprechend der Prozeßspezifik (Anwendungsbeispiel) in einer Übersicht.

4.2.2 Neues Fuzzy-Modell zur Beschreibung des physikalischen Parameters Wärmestrom

4.2.2.1 Vorbetrachtungen

Im folgenden Abschnitt wird der Schwerpunkt auf die Beschreibung des Fuzzy-Modells zur Nachbildung der nichtmeßbaren Prozeßgröße Wärmestrom gerichtet. Dabei wird dargestellt, welche Ein- und Ausgangsgrößen mit welcher Struktur für das Fuzzy-Modell zu wählen sind, um eine genaue Wiedergabe der nichtlinearen dynamischen Charakteristik des Wärmestromes zu gewährleisten. Es werden ausschließlich physikalische Meßgrößen und daraus abgeleitete Prozeßsignale auf der Grundlage der übersichtlichen Struktur der umfangreichen Datenbasis (Anhang A 1.2) als Ein- und Ausgangsgrößen für die Fuzzy-Modelle verwendet.

Mit dem Einsatz der Fuzzy-Set Theorie auf der Basis des vorhandenen Erfahrungs- und Expertenwissen lassen sich folgende Vorteile formulieren [Trai00]:

⇒ Modellvereinfachung:

Bezogen auf eine analytische Modellierung werden mit dem Fuzzy-Modell des Wärmestromes durch die Formulierung eines globalen Zusammenhangs folgende Vereinfachungen erzielt:

- DGL für die Temperaturänderung nicht erforderlich,
- Modellierung der Wärmeübergangszahl und der Strömungsverhältnisse ist enthalten.

Die fuzzy-basierte Modellierung von Teilprozessen mit Anwendung des Modells im gesamten Parameterbereich der Versuchsanlage bedeutet damit eine erhebliche Parameterreduktion gegenüber der analytischen Beschreibung des Wärmestromes.

⇒ Vereinfachung der Adaption:

- Mit Hilfe der Fuzzy-Modelle werden Kennfelder generiert, die den Zusammenhang zwischen den entstehenden Wärmeströmen in den beiden Zonen des Druckbehältermodells und den meßbaren Eingangsgrößen bzw. daraus abgeleiteten Größen repräsentieren.
- Im Fuzzy-Modell ist das vollständige Wissen über den Wärmeübergangsprozeß abgelegt. Mit Hilfe der Fuzzy-Set Theorie eröffnet sich eine einfache und transparente Möglichkeit, das Kennfeld auf die Anlagenverhältnisse, Experimente und Simulationen anzupassen.
- Durch die Verwendung von einfachen Regeln, die daten- und erfahrungsgestützt sind, sowie durch die Anwendung von Meßgrößen als Eingangsgrößen wird die Transparenz im Gegensatz zu einem analytischen Modell erhöht.

Gezeigt wird, daß eine fuzzy-basierte Adaption des Wärmestroms als Eingangsgröße für das nichtlineare Beobachtermodell über den gesamten technologischen Parameterbereich der Versuchsanlage DHM mit hinreichender Genauigkeit möglich ist. Mit diesem Modell wird eine Beobachtung im Normalbetrieb und bei negativen Drucktransienten gewährleistet.

4.2.2.2 Struktur

Im Ergebnis umfangreicher Voruntersuchungen und Sensibilitätsanalysen im Hinblick auf Anzahl und Wahl der Eingangsgrößen, der Berücksichtigung der Dynamik des Prozesses sowie des Tests verschiedener Modellvarianten [Fens97-2, 3; Hamp98, 99-1, 2, 00; Trai00] kommt der Ansatz des neuen erweiterten Fuzzy-Modells mit externer Dynamik zum Einsatz.

Für die Zielstellung im Rahmen der kontinuierlichen Prozeßbeobachtung des Füllstandes sind folgende prozeßspezifische Anforderungen bei der Modellierung des Wärmestromes zu erfüllen:

- ⇒ Erhöhung des Gültigkeitsbereiches für verschiedene Anfangsdrücke bezüglich der Eindeutigkeit der Unterscheidung der Transienten anhand des Anfangsdruckes,
- ⇒ Bestimmung der maximal erreichten Druckänderungsgeschwindigkeiten der Transienten zur Unterscheidung der Leckgröße,
- ⇒ Erhöhung der Robustheit der Algorithmen bei aufeinanderfolgenden Transienten,
- ⇒ Generierung eines Signals, welches den Prozeßzustand zwischen Normalbetrieb und Störfall (negative Drucktransiente) unterscheidet.

Hinsichtlich der gestellten Anforderungen sind signifikante robuste Prozeßinformationen und -signale zu generieren. Die Ableitung dieser Signale erfolgt aus der Datenanalyse (Anhang A 1.6). Die Analysen (s. auch Anhang A 1.4) haben ergeben, daß die dominante Eingangsgröße für diesen Prozeß die Druckänderungsgeschwindigkeit ist. Weitere signifikante Größen zur Charakterisierung des Wärmeübergangsprozesses sind:

- ⇒ Druckänderungsgeschwindigkeit dp/dt ,
- ⇒ Wert des Druckes zu Beginn der Störung,
- ⇒ Erkennung von Beginn und Ende der Störung.

Die Prozeßinformationen über Beginn und Ende der Transiente werden mit dem Signal Druckstörung ermittelt. Das Signal Druckstörung wird aus den vorhandenen Meßinformationen generiert und zeigt die Störung anhand des Druckverhaltens an. Es wird abhängig vom Prozeßzustand auf Normalbetrieb (0) oder Störung (1) umgeschaltet (Anhang A 1.6). Den Anfangsdruck bei Beginn der plötzlichen Druckentlastung gibt das Signal $p_{\text{stör}_a}$ wieder. Das Signal $p_{\text{stör}_a}$ ist ein signifikantes Signal zur Beschreibung des Prozeßzustandes (während der Störung konstant), welches aus dem aktuell anliegenden Druckmeßwert zu Beginn der Störung ermittelt wird. Beide Größen werden mit Hilfe von Algorithmen diagnostiziert, die durch klassische Logik- und Schaltoperationen gekennzeichnet sind (Anhang A 1.6). Das Bild 4-5 zeigt beispielhaft für das Abblaseexperiment 48 die Prozeßgrößen Druck p , Druckänderungsgeschwindigkeit dp/dt und die daraus ermittelten Prozeßsignale wie Druckstörung und $p_{\text{stör}_a}$. Diese bilden die Eingangsgrößen des neuen Fuzzy-Modells mit externer Dynamik für den Wärmestrom.

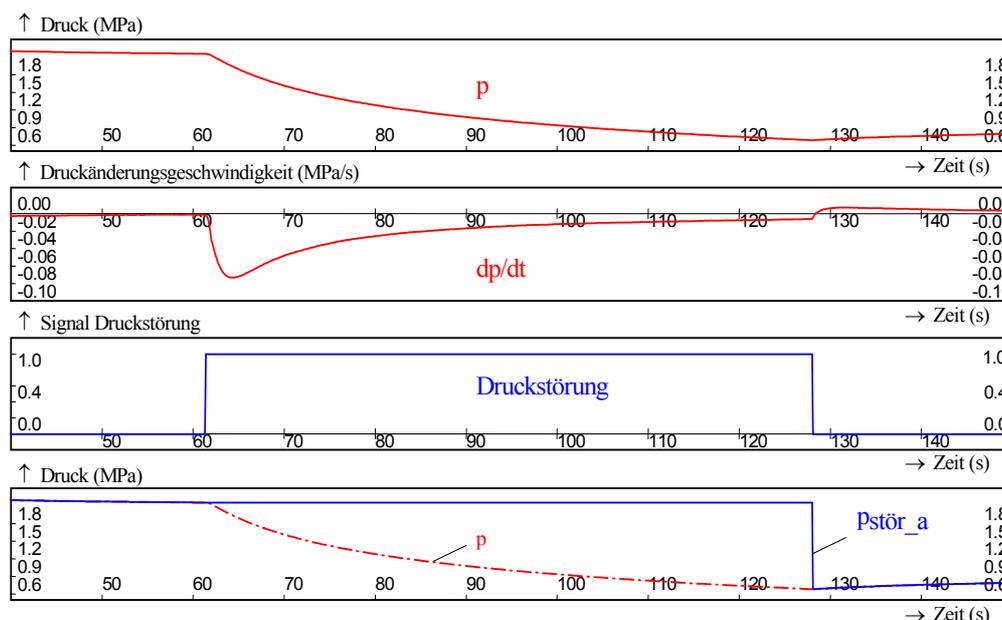


Bild 4-5: Darstellung des Meßsignals Druck p , des Signals Druckänderungsgeschwindigkeit dp/dt und der ermittelten Eingangsgrößen für die Fuzzy-Modelle (Prozeßsignal Druckstörung, Prozeßparameter Anfangsdruck bei Beginn der Störung $p_{\text{stör}_a}$)

Die Ausgangsgrößen des Fuzzy-Modells sind die Wärmeströme Zone 1 und 2 (\dot{Q}_1, \dot{Q}_2) entsprechend dem nodalen Gemischraummodell für jeweils große und kleine Druckgradienten. Die Erweiterung um die externe dynamische Struktur bedeutet, daß der als Ausgangsgröße berechnete Wärmestrom zurückgeführt wird, und damit eine weitere Eingangsgröße für das Fuzzy-Modell bildet. Die direkte Ausgangsgröße des Fuzzy-Modells ist die zeitliche Ableitung des Wärmestroms (Gradient oder Änderungsgeschwindigkeit). Diese Größe wird integriert und auf das Fuzzy-Modell rückgeführt. In den Integrator kann bei Kenntnis der Anfangsbedingungen ein Wert eingegeben werden (Standard ist $\dot{Q}_{1,2,0} = 0$). Die entwickelte Struktur des Fuzzy-Modells mit externer Dynamik für die Wärmeströme Zone 1 und 2 mit den definierten Eingangs- und Ausgangsgrößen demonstriert das Bild 4-6.

Kennfeldumschaltung

Für die entsprechenden Bereiche der maximal erreichten Druckänderungsgeschwindigkeiten dp/dt wurden separate Fuzzy-Modelle [klein, groß] entworfen. Zur Gewährleistung der kontinuierlichen Prozeßbeobachtung ist das Fuzzy-Modell mit integrierter Modellumschaltung zur Ermittlung des aktuellen Wärmestromwertes zwischen dem niedrigen Parameterbereich für die kleine Blende und dem hohen Parameterbereich für die große Blende ausgestattet. Dafür wird das Signal Maximalwert der erreichten Druckänderungsgeschwindigkeit $dp/dt|_{\text{max}}$ (während des Druckentlastungsvorganges) benötigt, welches eine gute Separierung der negativen Drucktransienten in Abhängigkeit von der Leckgröße ermöglicht. Der Wert $dp/dt|_{\text{max}}$ wird mit klassischen Algorithmen berechnet (Anhang A 1.6). Entsprechend des ermittelten scharfen Wertes wird ein scharfer Schwellwert definiert. Dieser findet Eingang in einen Komparator, der als Ausgang den für die Umschaltung definierten Kennfeldfaktor Q_{KF} liefert. Q_{KF} kann in Abhängigkeit des Schwellwertes den Wert 0 oder 1 annehmen ($Q_{\text{KF}} \in \{0, 1\}$). Für diesen speziellen Anwendungsfall haben Tests ergeben, daß eine

scharfe Kennfeldumschaltung im oben beschriebenen Sinne ausreichend ist. Die Gleichung (4.11) zur Ermittlung des gültigen Wärmestroms der jeweiligen Zone lautet [Hamp99-1]:

$$\dot{Q}_{1,2} = \dot{Q}_{-KF} \cdot \dot{Q}_{1,2[\text{gro\ss}]} + (1 - \dot{Q}_{-KF}) \cdot \dot{Q}_{1,2[\text{klein}]} \quad (4.11)$$

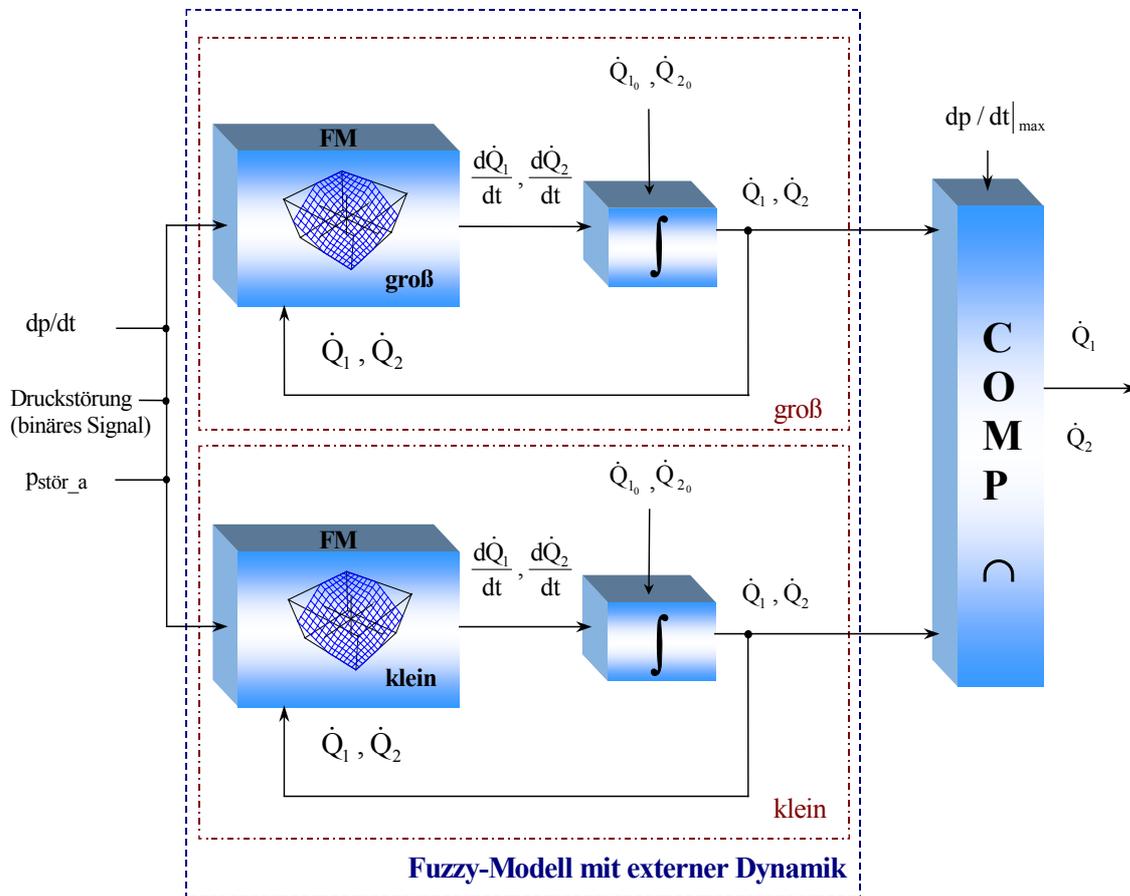


Bild 4-6: Fuzzy-Modell mit externer Dynamik zur Ermittlung des Wärmestromes Zone 1 und 2

Basisregel

Die Basisregeln für das erweiterte Fuzzy-Modell mit externer Dynamik zur Nachbildung der Wärmeströme der Zone 1 und 2 jeweils für die Bereiche [klein] und [groß] lauten:

$$\begin{aligned} \text{WENN 'Druckstörung' UND 'p_{stör_a}' UND 'dp/dt' UND 'Q_1'} \\ \text{DANN 'dQ_1/dt'} \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \text{WENN 'Druckstörung' UND 'p_{stör_a}' UND 'dp/dt' UND 'Q_2'} \\ \text{DANN 'dQ_2/dt'} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Zugehörigkeitsfunktionen

Die Definition der linguistischen (ling.) Variablen, der Zugehörigkeitsfunktionen (ZGF) und die Generierung der Regelbasis erfolgt auf der Grundlage von Referenzdatensätzen der

Experimente 1, 4, 8, 39 und 51 (Blende groß), Experimente 2, 5, 9, 21 und 28 (Blende klein) (Anhang A 1.2) entsprechend dem Parameterbereich der Versuchsanlage. Die Definition der linguistischen Variablen und der Zugehörigkeitsfunktionen ist Bild 4-7 bis Bild 4-8 zu entnehmen. Aufgrund der Struktur der gewählten Eingangsgrößen werden für die hohen und niedrigen Druckgradienten die gleichen Zugehörigkeitsfunktionen für die Eingänge genutzt. Für die linguistische Variable Anfangswert des Druckes bei Beginn der Störung $p_{\text{stör}_a}$ werden drei Zugehörigkeitsfunktionen benötigt (Bild 4-7). Die Zugehörigkeitsfunktion für die Druckänderungsgeschwindigkeit ist so konstruiert, daß der gesamte Parameterbereich überstrichen wird (Bild 4-8).

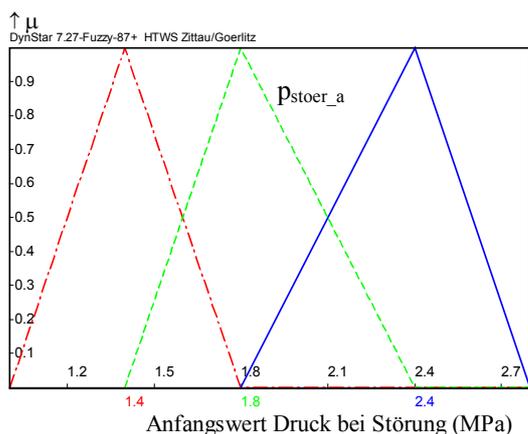


Bild 4-7: ZGF der linguistischen Variable Anfangswert des Druckes bei Beginn der Störung $p_{\text{stör}_a}$

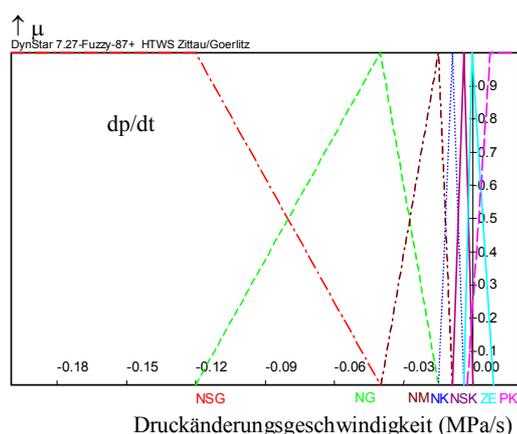


Bild 4-8: ZGF der linguistischen Variable Druckänderungsgeschwindigkeit dp/dt

Die Definition der linguistischen Variablen und der Zugehörigkeitsfunktionen für die direkte Ausgangsgröße des Fuzzy-Algorithmus Gradient des Wärmestroms ist repräsentativ für die Zone 2 $d\dot{Q}_2/dt$ in Bild 4-9 und Bild 4-10 für die Parameterbereiche [groß, klein] illustriert. Analog ist die Vorgehensweise für den Wärmestrom Zone 1.

Infolge der hohen Dynamik des Prozesses und der Nullpunktsensibilität ist auch hier eine hohe Anzahl von Zugehörigkeitsfunktionen zur Beschreibung der nichtlinearen Charakteristik (Abdeckung des gesamten Parameterbereiches) notwendig. Analysen haben gezeigt [Hamp99-1], daß für solche dynamischen Ausgangsgrößen eine wesentlich höhere Anzahl von Zugehörigkeitsfunktionen für die linguistischen Variablen in Abhängigkeit vom Gradienten im Kennfeld erforderlich sind.

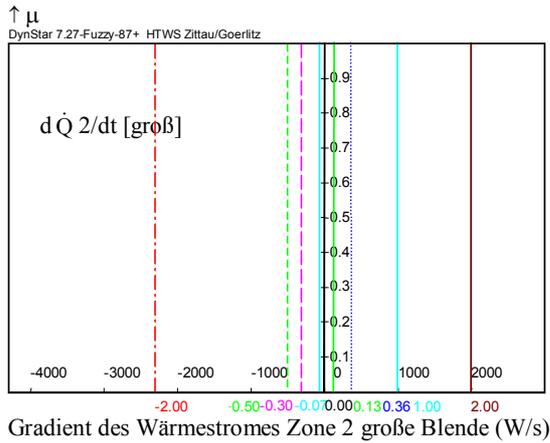


Bild 4-9: ZGF der ling. Variable
Gradient Wärmestrom $d\dot{Q}_2/dt$ [groß]

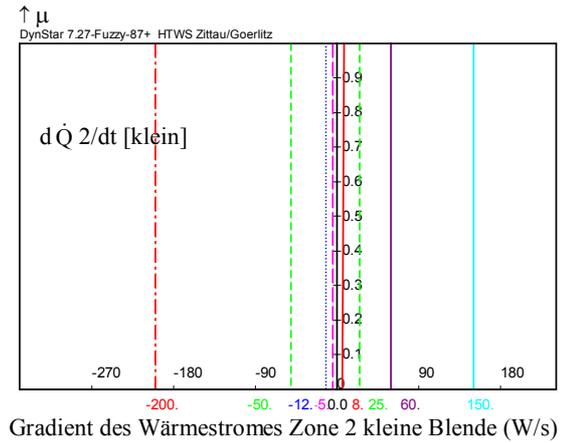


Bild 4-10: ZGF der ling. Variable
Gradient Wärmestrom
 $d\dot{Q}_2/dt$ [klein]

Das Bild 4-11 und Bild 4-12 zeigen die Definition der linguistischen Variablen und der Zugehörigkeitsfunktionen für die Ausgangsgröße des erweiterten dynamischen Fuzzy-Modells Wärmestrom für die Zone 2 für den hohen Parameterbereich \dot{Q}_2 [groß] und den niedrigen Parameterbereich \dot{Q}_2 [klein].

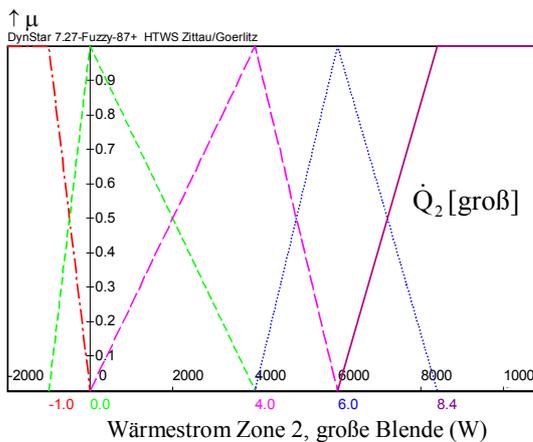


Bild 4-11: ZGF der ling. Variable
Wärmestrom \dot{Q}_2 [groß]

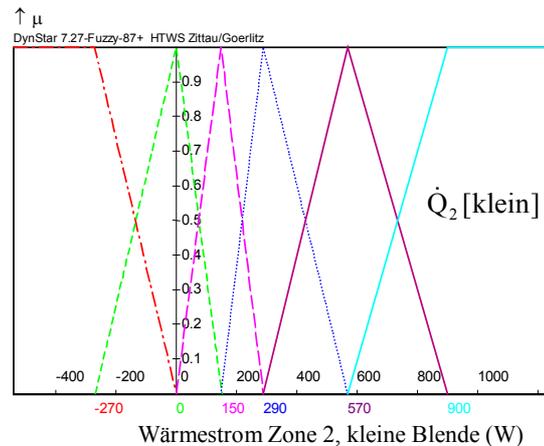


Bild 4-12: ZGF der ling. Variable
Wärmestrom \dot{Q}_2 [klein]

Regelbasis

Die Einzelregeln werden gemäß der Basisregel aufgestellt und wieder in einer Regeltabelle zusammengefaßt. Für jede Zone (1 und 2) müssen jeweils Regeln für den hohen und den niedrigen Parameterbereich aufgestellt werden ($\dot{Q}_{1,2}$ [klein, groß]). Einige ausgewählte Einzelregeln der Regelbasis für den Wärmestrom der Zone 2 \dot{Q}_2 [groß] lauten wie folgt [Fens97-3]:

WENN 'Druckstörung'= '1' UND 'pstätör_a'=1.8' UND 'dp'= 'NSG'UND ' \dot{Q}_2 groß'= '4.0'
DANN ' $d\dot{Q}_2/dt$ groß'= '1.00'

WENN 'Druckstörung'= '1' UND 'pstätör_a'=1.8' UND 'dp'= 'NM' UND ' \dot{Q}_2 groß'= '8.4'

```

DANN 'dQ̇₂/dtgroß'='-0.30'
WENN 'Druckstörung'='1' UND 'p_stör_a'='1.4' UND 'dp'='NG' UND 'Q̇₂ grob'='0.0'
  DANN 'dQ̇₂/dtgroß'='1.00'
WENN 'Druckstörung'='1' UND 'p_stör_a'='1.4' UND 'dp'='ZE' UND 'Q̇₂ grob'='-1.0'
  DANN 'dQ̇₂/dtgroß'='0.00'
WENN 'Druckstörung'='1' UND 'p_stör_a'='1.4' UND 'dp'='NSK'UND 'Q̇₂ grob'='4.0'
  DANN 'dQ̇₂/dtgroß'='-0.07'
WENN 'Druckstörung'='1' UND 'p_stör_a'='2.4' UND 'dp'='NG' UND 'Q̇₂ grob'='0.0'
  DANN 'dQ̇₂/dtgroß'='1.00'

```

Für die Formulierung der Regelbasis werden für bestimmte Parameterbereiche, wenn keine negative Drucktransiente (Störung) vorliegt oder der Druck ansteigt (positiver Druckgradient), auch sogenannte unvollständige Einzelregeln verwendet, die diesen stationären Prozeßzustand ausreichend charakterisieren.

```

WENN 'Druckstörung'='0' UND 'dp'='ZE' UND 'Q̇₂ grob'='0.0'
  DANN 'dQ̇₂/dtgroß'='0.00'
WENN 'dp'='PK' UND 'Q̇₂ grob'='6.0' DANN 'dQ̇₂/dtgroß'='-2.00'

```

Kennfeld

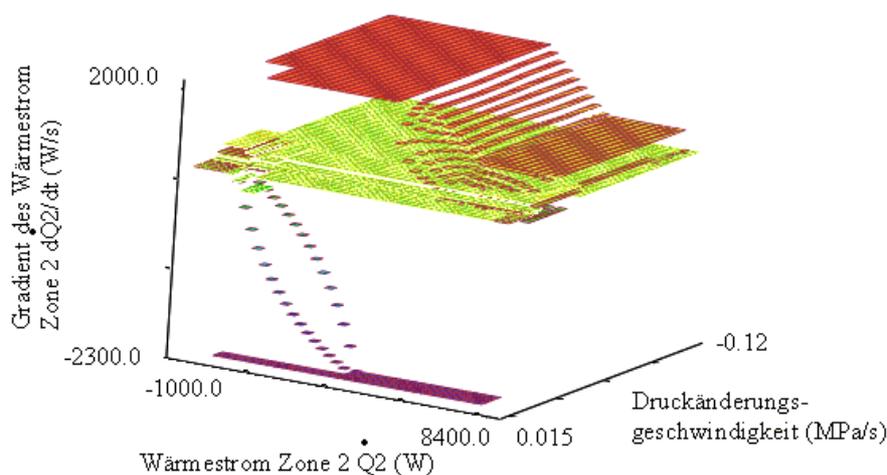


Bild 4-13: Kennfeld des Fuzzy-Modells mit externer Dynamik (Gradient des Wärmestroms $d\dot{Q}_2/dt = f(\dot{Q}_2, dp/dt)$, große Blende im Arbeitspunkt $p_{\text{stör}_a} = 1.8$ MPa und Druckstörung = 1

Wegen des mehrdimensionalen Zusammenhangs zwischen den definierten Ein- und Ausgangsgrößen für das erweiterte Fuzzy-Modell mit externer Dynamik ist eine Darstellung im Kennfeld nur als Projektion in den dreidimensionalen Raum möglich. Die für die Illustration genutzten Eingangsgrößen werden mit dem Programm DynStar variiert, zwei Eingangsgrößen

werden konstant gehalten. Die konstant gehaltenen Größen sind für dieses Beispiel (Wärmestrom Zone 2) der Wert für den Anfangsdruck zu Beginn der Störung $p_{\text{stör}_a} = 1.8 \text{ MPa}$ und das Signal Druckstörung = 1 (Störung liegt vor). Die mit dem Fuzzy-Algorithmus für den hohen und niedrigen Parameterbereich erzeugten Kennfelder werden übereinandergelegt. Das generierte Kennfeld mit den zugehörigen Abhängigkeiten Gradient des Wärmestroms $d\dot{Q}_2/dt$ (direkte Ausgangsgröße des Fuzzy-Modells) als Funktion des Wärmestromes \dot{Q}_2 und der Druckänderungsgeschwindigkeit dp/dt ist für große (dunkel schraffiert) und kleine Druckgradienten (hell schraffiert) in Bild 4-13 veranschaulicht (Kennfeldausschnitt im Arbeitspunkt).

Damit wird die nichtlineare Charakteristik der Übertragungsfunktion des Wärmeübergangsprozesses illustriert. Der von den beiden Kennfeldern eingeschlossene Raum repräsentiert den Bereich, in dem der Prozeß abläuft. Die Darstellung bildet einen Ausschnitt des Gesamtkennfeldes in einem Arbeitspunkt ab, d. h. es wird nur ein Teil der gesamten Regelbasis dargestellt. Zwischen den Stützstellen (Regelbasis) wird linear interpoliert. Der Sprung im Kennfeld, gekennzeichnet durch betragsmäßig große negative Änderungsgeschwindigkeiten des Wärmestromes und gering negative bis positive Druckänderungsgeschwindigkeiten wird durch das Schließen des Lecks nach dem Ende des Abblasen bewirkt. Die Ursachen dafür sind das Kollabieren des Gemischfüllstandes und eine damit verbundene schlagartige Verringerung des Wärmetransportes an das Wasser-Dampf Gemisch der Zone 2.

Simulationsergebnisse

⇒ Funktionsfähigkeit

Im folgenden werden Ergebnisse zum Test der Funktionsfähigkeit der Fuzzy-Algorithmen für die Simulation des Wärmestromes mit dem Fuzzy-Modell mit externer Dynamik diskutiert. Im Bild 4-14 wird der Vergleich für ein Abblaseexperiment im hohen Parameterbereich durchgeführt, das als Referenzdatensatz für die Erstellung der Fuzzy-Algorithmen verwendet wurde (Experiment 4). Gezeigt sind die durch den ATHLET-Code bereitgestellte Prozeßgröße (\dot{Q}_2_{ATH}) und der durch das erweiterte dynamische Fuzzy-Modell nachgebildete Wärmestrom der Zone 2 ($\dot{Q}_2_{\text{FUZ_groß}}$). Für alle Referenzdatensätze wird ein sehr gutes Simulationsergebnis erzielt, der relative Fehler bei der Nachbildung der Wärmeströme in der Zone 1 und 2 im Verlauf der Transiente liegt bezogen auf den Prozeß unter 5 % .

Bestätigt wird das sehr gute Simulationsergebnis durch Bild 4-15. Hier wird die Nachbildung des Wärmestroms für das Abblaseexperiment 5 mit der kleinen Blende demonstriert. Bezüglich des Experimentes liefert das Fuzzy-Modell richtige Ergebnisse mit sehr guter Genauigkeit (5 %). Damit ist die Funktionsfähigkeit dieses Fuzzy-Modells nachgewiesen. Für die sehr gute Nachbildung der Dynamik ist besonders die Eingangsgröße Druckänderungsgeschwindigkeit wichtig, sowie die Rückführung des Wärmestromwertes als weitere Eingangsgröße des Fuzzy-Modells.

Das entworfene neue Fuzzy-Modell mit externer Dynamik für den Wärmestrom arbeitet stabil, was zum einen auf den datenbasierten Entwurf und das vorhandene Prozeßwissen

zurückgeführt werden kann. Zum anderen arbeitet das Fuzzy-Modell immer in der Nähe des (technologischen) Arbeitsbereiches der Versuchsanlage, d. h. dieser wird nicht verlassen. Die über Abschätzungen ermittelte kleinste Zeitkonstante des Prozesses beträgt $T_{\text{klein}} = 3 \text{ s}$. Damit ist die Stabilität (auch s. Abschnitt 2.2.2) der Simulation gesichert, wenn t_A mindestens zu 0,3 gewählt wird. Die bei allen generierten Programmen verwendete Abtastzeit mit $t_A = 0,1 \text{ s}$ ist sehr viel kleiner, damit arbeitet die Simulation stabil.

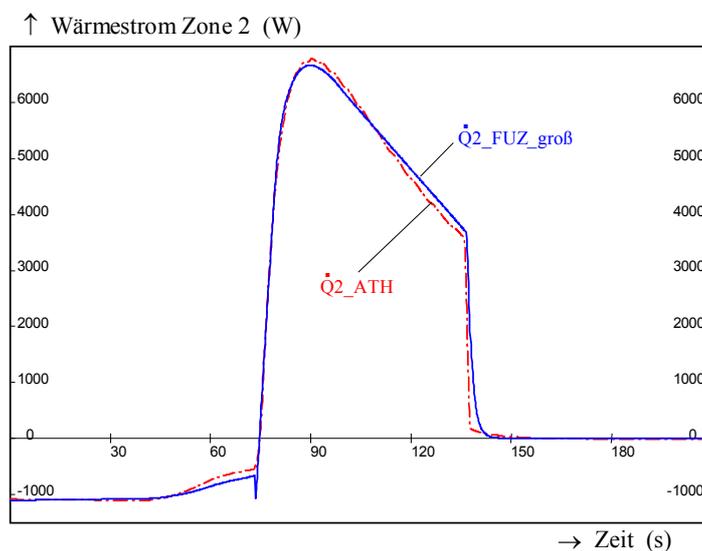


Bild 4-14: Zeitlicher Verlauf des Wärmestromes der Zone 2 berechnet mit ATHLET (\dot{Q}_2_{ATH}) und mit dem erweiterten dynamischen Fuzzy-Modell ($\dot{Q}_2_{\text{FUZ_groB}}$) für das Experiment 4

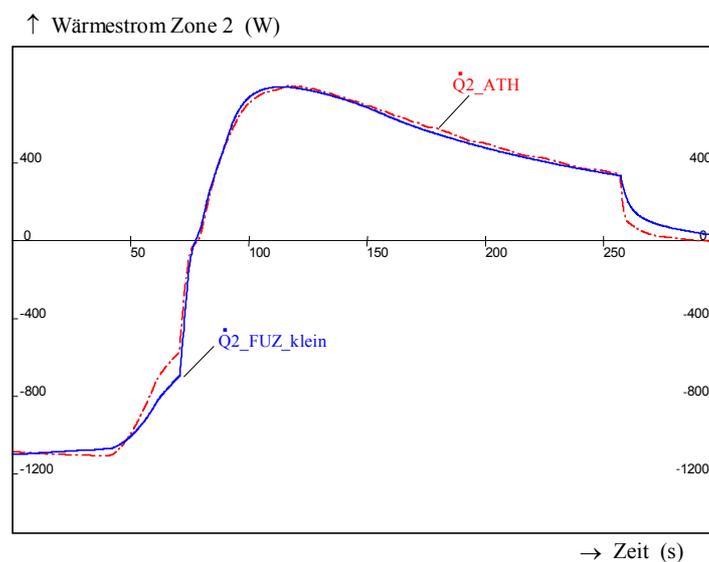


Bild 4-15: Zeitlicher Verlauf des Wärmestromes der Zone 2 berechnet mit ATHLET (\dot{Q}_2_{ATH}) und mit dem erweiterten dynamischen Fuzzy-Modell ($\dot{Q}_2_{\text{FUZ_klein}}$) für das Experiment 5

⇒ Gültigkeitsbereich

Der Nachweis des Gültigkeitsbereichs des Modells bezüglich der Anlage wird anhand der bei der Modellierung nicht verwendeten Datensätze der Experimentreihe 2 durchgeführt. Die Ergebnisse werden für das Experiment 14 mit der großen Blende dokumentiert. Im Bild 4-16 wird die nachgebildete Trajektorie für den Wärmestrom Zone 2 für das dynamische Modell $\dot{Q}_2_FUZ_gro\ddot{b}$ mit dem Prozeß \dot{Q}_2_ATH verglichen. Das dynamische Modell bildet den Wärmestrom mit einer Genauigkeit von 5 % nach. Diese Aussage gilt für alle Datensätze, deren Anfangsdruck im Parameterbereich von $p_0 = 2,4..1,4$ MPa variiert. Der relative Fehler, auf den Prozeß bezogen, liegt im Beobachtungszeitraum für diese Datensätze zwischen 5 und 8 %, welches die hohe Güte bestätigt. Damit sind die Robustheit und die guten Interpolationseigenschaften des Fuzzy-Modells bestätigt. Das heißt, geringfügige Abweichungen in den Einzelparametern bewirken keine Änderungen oder Fehler für die Ausgangsgröße. Die Angaben für das erweiterte Fuzzy-Modell mit externer Dynamik sind auch für den Wärmestrom Zone 1 im Parameterbereich der Versuchsanlage gültig.

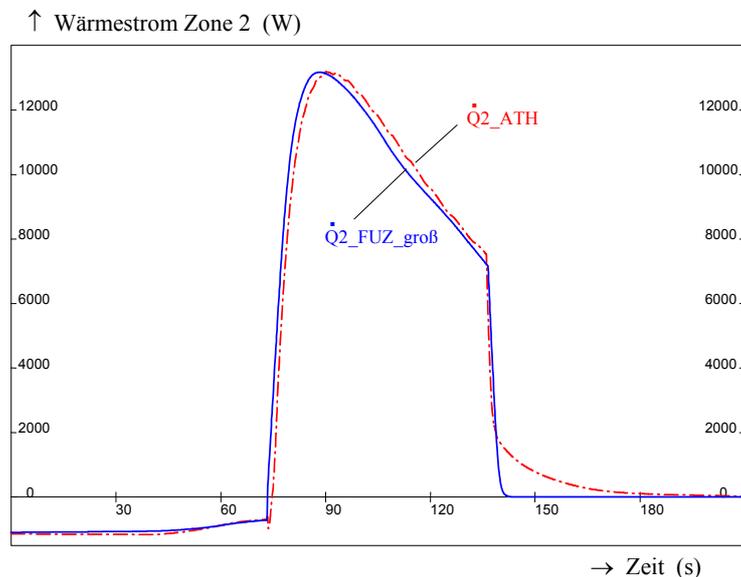


Bild 4-16: Zeitlicher Verlauf des Wärmestromes der Zone 2 berechnet mit ATHLET (\dot{Q}_2_ATH) und mit dem dynamischen Fuzzy-Modell ($\dot{Q}_2_FUZ_gro\ddot{b}$) für das Experiment 14

Simulation von zwei aufeinanderfolgenden Transienten

Um den Gültigkeitsbereich und die Leistungsfähigkeit des neuen Fuzzy-Modells für die kontinuierliche Prozeßbeobachtung im weiteren nachzuweisen, wird eine Simulation mit zwei aufeinanderfolgenden Transienten durchgeführt. Für diesen Zweck werden zwei repräsentative negative Drucktransienten (p_ATH) miteinander verknüpft (I + II) und nacheinander simuliert. Dadurch wird gleichzeitig die Funktionsfähigkeit der Kennfeldumschaltung für den hohen (I) und niedrigen (II) Parameterbereich demonstriert.

Für diese Simulation werden die Transienten 8 (I) und 9 (II) zusammengesetzt. Das Bild 4-17 zeigt die Ergebnisse der Simulation mit dem erweiterten Fuzzy-Modell mit externer Dynamik $\dot{Q}_2_FUZ_groß$, $\dot{Q}_2_FUZ_klein$ im Zusammenhang mit dem dazugehörigen Druckverlauf p_ATH und dem Wärmestrom vom Prozeß \dot{Q}_2_ATH .

Der Anfangsdruck ist für beide Transienten $p_0 = 2,4$ MPa. Die Sprünge in den zeitlichen Verläufen der Meßgröße Druck entstehen durch das Zusammenfügen der Daten der Experimente. Das neuerliche Einstellen des Anfangsdruckes durch das Aufheizen der Versuchsanlage ist nicht mit aufgezeichnet (Versuchsablauf s. Anhang A 1.2). Der Wärmestrom im Anfangszustand, der durch das Abschalten der Heizung entsteht (langsame Wärmeabgabe Wasser-Dampf Gemisch \Rightarrow Wand), wurde im Modell zunächst nicht berücksichtigt, sondern gleich Null gesetzt (realer stationärer Zustand). Es ist deutlich zu erkennen, daß das Fuzzy-Modell bei Detektion des Druckabfalls einschaltet und den Wärmestrom in der Zone 2 für beide Blendendurchmesser durch die Kennfeldumschaltung richtig reproduziert.

Bei der ersten Transiente (I) wird die Regeltabelle für den hohen Parameterbereich aktiviert, im zweiten Fall (II) erfolgt die Aktivierung für den niedrigen Parameterbereich (kleine Blende). Beim Schließen des Lecks, wenn die Transiente beendet ist, wird der Wärmestrom ebenfalls für beide Zeitverläufe richtig wiedergegeben. Der relative Fehler, der auf den Prozeß bezogen ist, liegt für die Nachbildung beider Zeitverläufe der Wärmeströme Zone 1 und 2 unter 3 %.

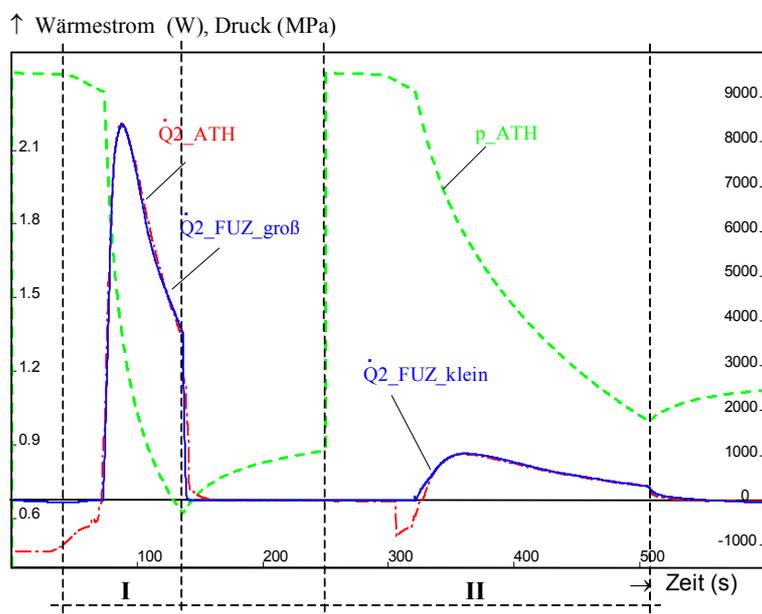


Bild 4-17: Zeitlicher Verlauf des Wärmestromes der Zone 2 berechnet mit ATHLET (\dot{Q}_2_ATH) und mit dem erweiterten dynamischen Fuzzy-Modell ($\dot{Q}_2_FUZ_groß$, $\dot{Q}_2_FUZ_klein$) für die Abblaseexperimente 8 und 9

Die Funktionsfähigkeit und der Gültigkeitsbereich der Fuzzy-Algorithmen für den Wärmestrom sind im Parameterbereich der Versuchsanlage für verschiedene Transienten entspre-

chend der unterschiedlichen Experimentreihen mit differierenden Anfangsbedingungen belegt worden. Damit ist das erweiterte Fuzzy-Modell mit externer Dynamik für die Simulation der Wärmeströme in den beiden Zonen und die Rekonstruktion des Massenfüllstandes in der Zone 1 und 2 (nodales Gemischraummodell für den Füllstand) im Beobachtungszeitraum geeignet. Mit den strukturierten Eingangsgrößen und der Erkennung der Störung ist eine kontinuierliche Prozeßbeobachtung im Normalbetrieb und Störfallbetrieb (negative Drucktransiente) durchführbar. Mit der Bestätigung der prinzipiellen Funktion des Fuzzy-Modells mit externer Dynamik ist dessen Anwendbarkeit erfolgreich nachgewiesen. Weitere Aufgaben hinsichtlich der Modellierung des Wärmestroms sind die Optimierung der Parametrisierung und der Anzahl der Zugehörigkeitsfunktionen und der Regeln.

4.2.3 Zustandsrekonstruktion des Massenfüllstandes Zone 1 und 2 mittels des hybriden nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachters

4.2.3.1 Nachweis der Funktionsfähigkeit

Das entwickelte erweiterte Fuzzy-Modell mit externer Dynamik für den Wärmestrom wurde in den klassischen nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachter (Abschnitt 4.1) entsprechend Bild 4-4 implementiert. Die Hybridstruktur wird mit dem Programm DynStar umgesetzt. In den folgenden Bildern werden die Rekonstruktionsergebnisse der Zustandsgrößen Massenfüllstand in den Zonen 1 (nichtmeßbar) und 2 (meßbar) mit dem Prozeßverlauf (ATHLET) für die folgenden Beobachervarianten verglichen:

- ⇒ klassischer nichtlinearer PI-Arbeitspunkt-Beobachter ($hm_1_nl_BEO$, $hm_2_nl_BEO$),
 - Modell ohne Berücksichtigung des Wärmestromes,
- ⇒ hybrider nichtlinearer PI-Arbeitspunkt-Beobachter ($hm_1_h_BEO$, $hm_2_h_BEO$),
 - Bestimmung des Wärmestromes durch ein Fuzzy-Kennfeld.

Die konstante Verstärkungsmatrix (zwei Zonen: $K_0 = 10$, $K_1 = -10$) für den hybriden nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachter wird analog dem klassischen Beobachter verwendet. Wie im Bild 4-18 zu sehen ist, ist die Rekonstruktion mittels des Hybridbeobachters (hm_h_BEO) durch eine geringere Abweichung gegenüber dem Prozeß (hm_ATH) für die nichtmeßbare Zustandsgröße (hm_1) gekennzeichnet. Dargestellt sind die Zeitverläufe für Experiment 4 (hoher Druckgradient). Im stationären Endzustand beträgt die bleibende Abweichung für den ebenfalls im Vergleich dargestellten klassischen Beobachter (hm_BEO) ca. 11 cm, für den Hybridbeobachter ca. 2.5 cm für hm_1 . Vor allem ist positiv zu vermerken, daß während der Transiente die Abweichung zwischen gemessenem Füllstandssignal und dem geschätzten durch den Hybridbeobachter nahezu konstant ist. Währenddessen ist der Einfluß des Wärmestroms (Zone 1) beim klassischen Beobachter durch steigende Abweichungen zu identifizieren. Durch die Einbeziehung des Wärmestromes in den Beobachteransatz wurde die Rekonstruktionsgüte in der Zone 1 gegenüber dem klassischen Ansatz um ca. 75 % verbessert. Für die meßbare Zustandsgröße (hm_2) wird die Übereinstimmung zum Prozeß erzielt.

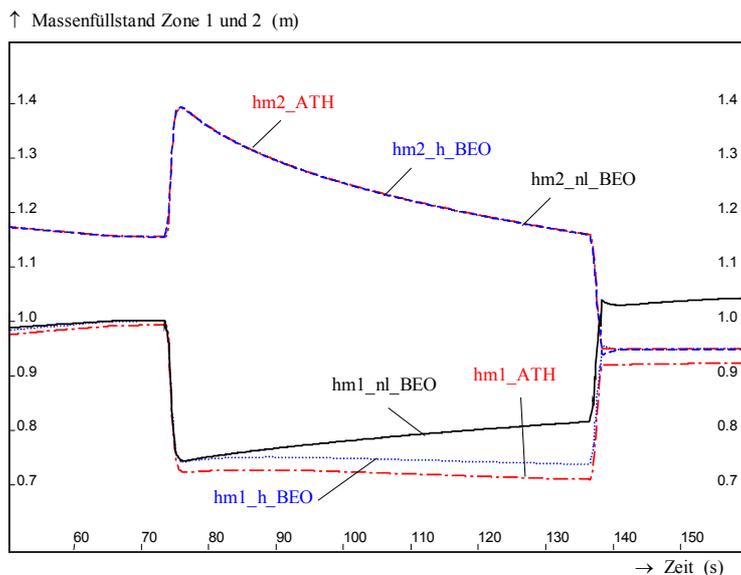


Bild 4-18: Zeitlicher Verlauf der Zustandsgrößen (Massenfüllstand der Zonen 1 und 2, hm) von Prozeß (ATH, gestrichpunktet), klassischem nichtlinearem PI-Arbeitspunkt-Beobachter (nl_BEO, durchgezogen) und hybridem nichtlinearem PI-Arbeitspunkt-Beobachter (h_BEO, gepunktet) für das Experiment 4

Sehr gut zu erkennen ist der Einfluß des nichtmeßbaren Wärmestroms im Bild 4-19, in dem für die Experimente 1 und 2 die Simulationsergebnisse für beide Parameterbereiche dargestellt sind. Der Einfluß des Wärmestromes auf die Rekonstruktionsgüte ist abhängig vom Druckgradienten. Bedingt durch den hohen Druckgradienten ist der Wärmestrom beim Experiment 1 rechts im Bild 4-19 größer als beim Experiment 2 links im niedrigen Parameterbereich. Dadurch ist der Rekonstruktionsfehler gegenüber dem Prozeß (hm_ATH) bei dem klassischen Beobachter (hm_nl_BEO) für den Füllstand hm₁_BEO für den hohen Druckgradienten höher (ca. 10 cm) als für den niedrigen (ca. 5,5 cm).

Durch den Einsatz des neuen hybriden nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachter (hm_h_BEO) wird die Rekonstruktionsgüte des nichtmeßbaren Massenfüllstandes Zone 1 gegenüber dem klassischen Beobachter erfolgreich verbessert. Für den geringeren Druckgradienten wird fast eine Übereinstimmung erzielt, für den höheren kann die Abweichung auf ca. 3,5 cm gesenkt werden, was ein sehr akzeptables Rekonstruktionsergebnis ist (65 % Verbesserung bezogen auf die Abweichung). Zudem ist durch die Nachbildung des Wärmestroms positiv zu bewerten, daß die Abweichung des Hybridbeobachters zum Prozeß während des gesamten Beobachtungszeitraum nahezu konstant bleibt, d. h. stark zunehmende Abweichungen sind nicht zu erwarten. Damit wirkt sich die hohe Güte der fuzzy-basierten Nachbildung des Wärmestromes vorteilhaft auf die Rekonstruktionsgüte und damit Funktionsfähigkeit des hybriden nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachters aus.

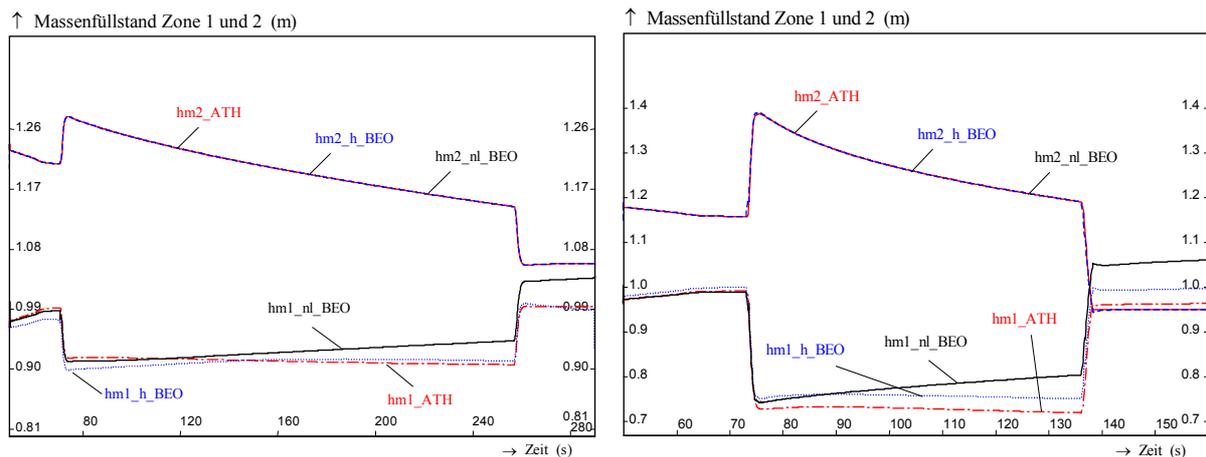


Bild 4-19: Zeitlicher Verlauf der Zustandsgrößen (Massenfüllstand der Zonen 1 und 2, hm) von Prozeß (ATH), klassischem nichtlinearem PI-Arbeitspunkt-Beobachter (nl_BEO) und hybridem nichtlinearem PI-Arbeitspunkt-Beobachter (h_BEO) für die Abblaseexperimente 1 und 2 (links, kleine Blende; rechts, große Blende)

4.2.3.2 Gültigkeitsbereich des hybriden Beobachters

Der Nachweis der Gültigkeitsbereich für diesen Prozeß im gesamten Parameterbereich der Versuchsanlage wird anhand mehrerer Experimente gezeigt. Diese repräsentieren die unbekanntes Trajektorien im Kennfeld. Zwischen den durch die Regeltabelle vorgegebenen Stützstellen (Referenzexperimente) wird mittels der Fuzzy-Algorithmen linear interpoliert. Die guten Rekonstruktionsergebnisse beweisen die guten Interpolationseigenschaften der Fuzzy-Algorithmen und die Einsetzbarkeit für die nichtlinearen dynamischen Prozesse.

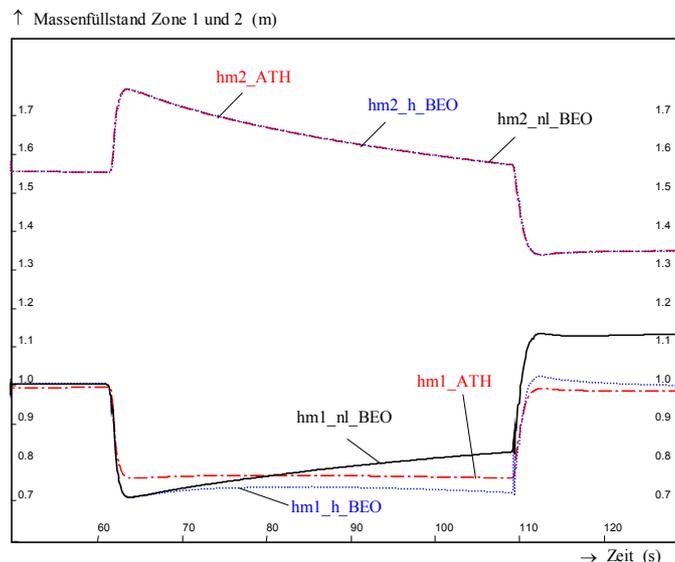


Bild 4-20: Zeitlicher Verlauf der Zustandsgrößen (Massenfüllstand der Zonen 1 und 2, hm) von Prozeß (ATH), klassischem nichtlinearem PI-Arbeitspunkt-Beobachter (nl_BEO) und hybridem nichtlinearem PI-Arbeitspunkt-Beobachter (h_BEO) für das Abblaseexperiment 36

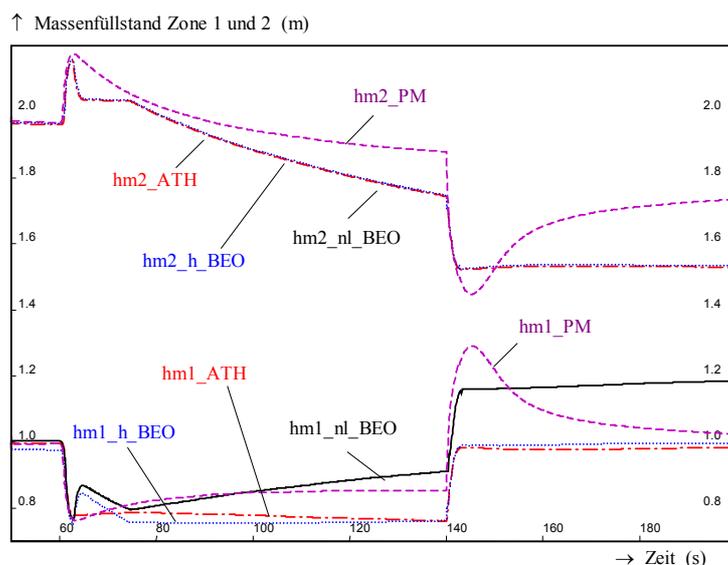


Bild 4-21: Zeitlicher Verlauf der Zustandsgrößen (Massenfüllstand der Zonen 1 und 2, hm) von Prozeß (ATH), klassischem nichtlinearem Parallelmodell (PM) und PI-Arbeitspunkt-Beobachter (nl_BEO), sowie hybridem nichtlinearem PI-Arbeitspunkt-Beobachter (h_BEO) für das Experiment 46 mit hohem Druckgradienten

Das Bild 4-20 stellt die Zeitverläufe des Prozesses (hm_ATH) für die Massenfüllstände in beiden Zonen für das Experiment 36 (hoher Druckgradient) im Vergleich zu den mit dem klassischen (hm_nl_BEO) und Hybridbeobachter (hm_h_BEO) rekonstruierten dar. Der Hybridbeobachter ist während der Transiente in der Lage, den nichtmeßbaren Massenfüllstand hm_1 mit einer Genauigkeit von 3,7 % Abweichung gegenüber dem Prozeß zu rekonstruieren. Die hohe, vor allem ansteigende Abweichung, die durch den klassischen Beobachter erzeugt wird (ca. 12 cm) ist nicht akzeptabel. Die Anwendbarkeit des hybriden nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachters im Parameterbereich der Versuchsanlage ist durch die erreichte hohe Güte erfolgreich gegeben. Der Beobachter liefert bei Vorhandensein der Meßgröße (meßbare Zustandsgröße) eine zuverlässige Information über die nichtmeßbare Zustandsgröße und den Prozeßverlauf im Fall negativer Drucktransienten.

Einen weiteren Vergleich stellt das Bild 4-21 dar (s. auch Abschnitt 4.1, Abblaseexperiment 46, Bild 4-3). Die Simulation mit dem Hybridbeobachter läßt eine deutliche Steigerung der Qualität der Rekonstruktionsgüte für den Massenfüllstand Zone 1 hm_1 im Vergleich zum klassischen nichtlinearen Parallelmodell und Beobachter (hm_PM, hm_nl_BEO) erkennen. Der Hybridbeobachter (hm_h_BEO) ist durch eine konstante Abweichung von ca. 2.6 cm gegenüber dem Prozeß (hm_ATH) charakterisiert, was auf eine hohe Rekonstruktionsgüte schließen läßt.

Da es sich hier um ein Experiment mit Meßbereichsüberschreitung handelt, wird allerdings der Nachteil eines Beobachters in diesem Fall auch für den Hybridbeobachter deutlich. Im Bereich der Meßbereichsüberschreitung wird zwar die Konvergenz zur Anzeige des Nahbereichsmeßsystems (Zone 2) hergestellt, die Limitierung aber auf die Rekonstruktion der Zustandsgröße 1 übertragen. Da der Gemischfüllstand mit diesem Verfahren aus dem nichtmeßbaren Massenfüllstand Zone 1 nach Gleichung (3.3) berechnet wird, wird sich der Fehler in diesem Bereich auch auf die Berechnung des Gemischfüllstandes auswirken (Abschnitt 6.3).

Weitere Untersuchungen und Vergleiche für Experimente mit Meßbereichsüberschreitung [Hamp99-1], auch mittels eines hybriden nichtlinearen Parallelmodells (Aufprägung des fuzzy-basiert nachgebildeten Wärmestroms auf das klassische Parallelmodell) erbrachten die gleichen Ergebnisse. Der Nachteil des Beobachters bei der Rekonstruktion der nichtmeßbaren Zustandsgröße aufgrund der Meßbereichsbegrenzung bleibt für den Hybridbeobachter bestehen. Das nichtlineare klassische Parallelmodell erfüllt die Anforderungen einer guten Rekonstruktion im Verlauf der Transiente sowie Wiederherstellen des stationären Zustandes auch nicht. Damit ist im Fall des Verlassens des Meßbereiches sowie des Meßsystemausfalls weiterhin zu schlußfolgern, daß ein alternatives Parallelmodell ohne Rückkopplung zu entwickeln ist.

4.3 Bewertung und Schlußfolgerungen

1. Das klassische nichtlineare Parallelmodell und der klassische nichtlineare PI-Arbeitspunkt-Beobachter werden aufgrund der Mängel nicht für die kontinuierliche Prozeßbeobachtung verwendet, sondern bildeten die Basis für die Weiterentwicklungen.
2. Die Erweiterung des Gültigkeitsbereiches des für höherdimensionale Modelle einsetzbaren klassischen nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachters wird für die Bestimmung des Massenfüllstandes in den Zonen 1 und 2 durch eine fuzzy-basierte Adaption des nichtmeßbaren physikalischen Parameters Wärmestrom für verschiedene Experimentreihen im gesamten Parameterbereich der Anlage erreicht.
3. Im Ergebnis der fuzzy-basierten Ermittlung des Wärmestromes ist der neue Hybridbeobachter über den gesamten technologischen Parameterbereich der Druckbehälterversuchsanlage durch eine deutliche Verbesserung der Rekonstruktionsgüte der nichtmeßbaren Zustandsgröße hm_1 (Massenfüllstand in der Zone 1) gegenüber dem klassischen Beobachter für den gesamten Beobachtungszeitraum gekennzeichnet.
4. Damit werden die guten Interpolationseigenschaften und die Robustheit des neuen erweiterten Fuzzy-Modells mit externer Dynamik für den Wärmestrom, die Zweckmäßigkeit des klassischen Beobachters sowie des hybriden nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachters für die Modellierung des Massenfüllstandes demonstriert.
5. Die Kombination der klassischen Verfahren der analytischen Redundanz (analytische Modellstrukturen) mit Methoden des Soft Computing (Fuzzy-Modell mit externer Dynamik) führt zu einer neuen Qualität von fortgeschrittenen modellgestützten Meßverfahren, dem neuen hybriden nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachter.

6. Der hybride nichtlineare PI-Arbeitspunkt-Beobachter wird als neues Verfahren zur Modellierung des Füllstandes im Rahmen des Konzeptes zur kontinuierlichen Prozeßbeobachtung eingesetzt.
7. Die Entwicklung des hybriden nichtlinearen Arbeitspunkt-Beobachters stellt einen Beitrag zur exakteren Modellierung nichtlinearer Prozesse mit Methoden des Soft Computing und Verfahren der analytischen Redundanz dar.

Entsprechend der Zielsetzung, den Einsatz fuzzy-basierter Algorithmen in modellgestützten Meßverfahren zu forcieren, sind für den Bereich der Meßbereichsüber- und -unterschreitung sowie für den Meßsystemausfall neue fuzzy-basierte Parallelmodelle für die Füllstandsbeobachtung auf der Grundlage der vorhandenen Datenbasis zu entwickeln (Kapitel 5).

5 Neue fuzzy-basierte Parallelmodelle zur Bestimmung des Füllstandes

5.1 Vorbetrachtungen

Um den Gemischfüllstand für die kontinuierliche Prozeßbeobachtung richtig zu rekonstruieren, wird ein neues Parallelmodell im Fall von Meßbereichüberschreitungen bzw. -unterschreitungen zum Einsatz gebracht. Dieses wird ausgehend von der Zielstellung, fuzzy-basierte Algorithmen zur Anwendung zu bringen, auf der Grundlage der Datenbasis und Erfahrungswissen realisiert. Für die Problematik des Meßsystemausfalls (Nahbereich) oder einer Fehlanzeige des Meßsystems wird ein neues fuzzy-basiertes Parallelmodell für den meßbaren Massenfüllstand (Nahbereich) zwischen den Einbindungen des Meßsystems entworfen [Fens98; Trai99].

In Ergänzung zu den Abschnitten 3.1.3.2 und 4.2.3.2 zeigt das Bild 5-1 die Problematik des Einflusses von Meßbereichüberschreitungen auf die Güte des Gemischfüllstandes, der aus den rekonstruierten Zustandsgrößen des Beobachters (nach Gleichung 3.3) berechnet wurde. Für das Abblaseexperiment 34 (hoher Druckgradient) an der Druckbehälterversuchsanlage DHM werden der Verlauf der Massenfüllstände (Nahbereich, hm_n_ATH) und (Weitbereich, hm_w_ATH), der mit Hilfe der ATHLET-Simulation (hg_ATH) sowie der aus den rekonstruierten Zustandsgrößen des Hybridbeobachters (hg_h_BEO) berechnete Gemischfüllstand dargestellt. Vor und nach der Druckentlastung liegen die Füllstände etwa auf gleichem Niveau, während der Transiente sind der Massenfüllstand (Nahbereich) und der Gemischfüllstand durch eine differierende Aufspreizung gekennzeichnet.

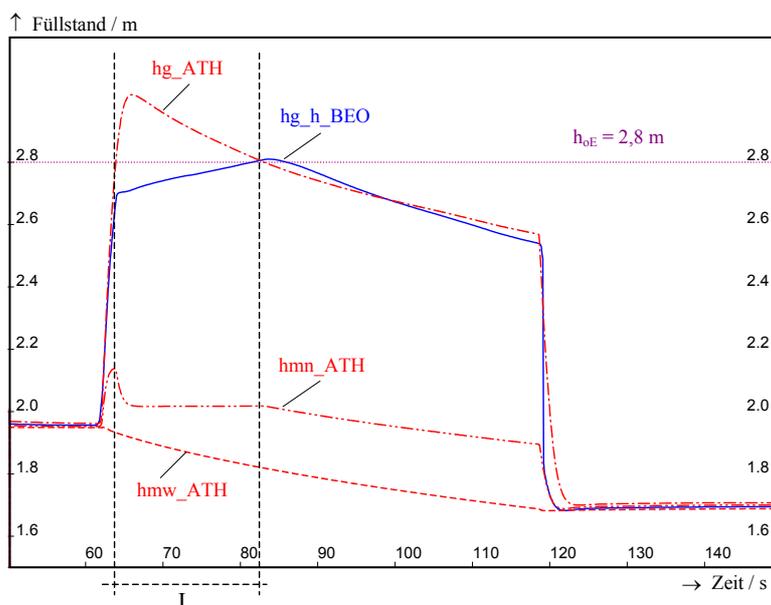


Bild 5-1: Zeitlicher Verlauf des Massenfüllstandes Nahbereich (hm_n_ATH) und Weitbereich, (hm_w_ATH), des Gemischfüllstandes (hg_ATH) sowie des Gemischfüllstandes aus den rekonstruierten Zustandsgrößen des hybriden PI-Arbeitspunkt-Beobachters (hg_h_BEO), Experiment 34

Der aus den rekonstruierten Zustandsgrößen des Hybridbeobachters berechnete Gemischfüllstand (hg_h_BEO) weist im Zeitraum der Meßbereichsüberschreitung (s. I) einen konstanten Verlauf auf, der um die Höhe der oberen Einbindung ($h_{oE} = 2,8$ m) schwankt. Ursache hierfür ist der Fakt, daß der Massenfüllstand (Nahbereich) in die Gemischfüllstandsrechnung eingeht und sich damit die Begrenzung des Meßsignals des Massenfüllstandes (Nahbereich) auch auf den berechneten Gemischfüllstand (hg_h_BEO) auswirkt. Aus diesem Grund weist der aus den rekonstruierten Zustandsgrößen berechnete Gemischfüllstand nachteiligerweise nicht die volle Füllstandsaufspreizung auf. Um den tatsächlichen Gemischfüllstandsverlauf ermitteln zu können, ist für den Zeitraum der Meßbereichsüber- bzw. -unterschreitungen vom hybriden MMV mit Rückführung (Nachteil des Beobachters) auf das entwickelte fuzzy-basierte modellgestützte Meßverfahren ohne Rückführung (Parallelmodell) für den Gemischfüllstand umzuschalten. Das gleiche gilt bei Verlust der Meßinformation durch Meßsystemausfall (Nahbereich), was sich fehlerhaft auf die Rekonstruktion des meßbaren und nichtmeßbaren Massenfüllstandes (Nahbereich) auswirkt, wobei hier auf das Parallelmodell zur Bestimmung des Massenfüllstandes umzuschalten ist.

Berechnet werden als Ausgangsgrößen der neuen fuzzy-basierten Parallelmodelle der Massenfüllstand (Nahbereich) und der Gemischfüllstand. Dadurch wird eine redundante Modellinformation bereitgestellt, die eine von dem Meßwert des Nahbereichsmeßsystem unabhängige Prozeßinformation liefert. Gegenüber der analytischen Bestimmung des Gemischfüllstandes wird damit die Modellierung von Teilprozessen, wie der Bestimmung des Dampfgehaltes in den beiden definierten Zonen des Druckbehälters abgedeckt. Der Dampfgehalt ist eine Sekundärgröße, für deren analytische Bestimmung verschiedene halbempirische Modelle mit unterschiedlicher Aussagekraft angewendet werden müssen (Kondensations- und Verdampfungsmodelle, Impulsbilanz, Driftmodell (Dampfblasengeschwindigkeit, Phasenseparation, Phasenschlupf)). Die Modellierung wird damit hinsichtlich der analytischen Bestimmung der Größen vereinfacht und es wird eine Parameterreduktion erreicht. Aus diesem Grund wird eine direkte Fuzzy-Modellierung in Form der Parallelmodelle auf der Grundlage von Meßgrößen und deren Ableitungen zum Einsatz gebracht.

Die Bewertung der Güte der durch das fuzzy-basierte Parallelmodell rekonstruierten Füllstände erfolgt anhand von Vergleichen mit Ergebnissen von Experimenten und Simulationen. Der Entwurf der Fuzzy-Modelle sowie die Simulation erfolgt mit der Fuzzy-Shell des Programmsystems DynStar.

5.2 Definition der Ein- und Ausgangsgrößen

Für den Entwurf der Fuzzy-Parallelmodelle wird zur Gewährleistung von Konsistenz und Vergleichbarkeit die gleiche Verfahrensweise wie im vorangegangenen Kapitel verwendet. Im folgenden wird die Herleitung der Modelle beschrieben. Die Ein- und Ausgangsgrößen werden anhand der Datenanalyse (Anhang A 1.4) festgelegt. Zur Bestimmung der Einflußgrößen auf die Größen Massenfüllstand (Nahbereich) und Gemischspiegel werden die Abblaseexperimente der Reihe 2 verwendet. Aus der Fülle der Experimente werden Versuche mit signifikanten Randbedingungen (Eckpunkte des Parameterbereiches der Anlage) ausgewählt, die als Referenzexperimente dienen (Tabelle A1-7).

5.2.1 Ausgangsgrößen

Ausgehend von der Zielstellung, ein regelbasiertes Fuzzy-Modell zu entwerfen, ist die Fragestellung nach den Ein- und Ausgangsgrößen der Fuzzy-Modelle prozeßspezifisch zu lösen. Die Ausgangsgrößen der Fuzzy-Parallelmodelle sind der meßbare Massenfüllstand (Nahbereich) und der Gemischfüllstand. Aufgrund der Analysen der Füllstandsverhältnisse zwischen dem Massenfüllstand (Weitbereich) und Massenfüllstand (Nahbereich) sowie Gemischfüllstand erweist es sich als vorteilhaft, Verhältnisfaktoren auf der Basis des direkt meßbaren Massenfüllstandes (Weitbereich) einzusetzen (Datenanalyse Anhang A 1.4). Damit wird eine Modellierung auf der Grundlage von Verhältnissen zum Massenfüllstand (Weitbereich) durchgeführt und damit die Dynamik des Prozesses indirekt nachgebildet.

Der Massenfüllstand (Weitbereich) ist eine globale, meßtechnisch gut und zuverlässig zu erfassende Größe, die von Meßbereichsüber- und -unterschreitungen wenig beeinflusst wird (auf einen großen, festen Meßbereich bezogen). Wie die globale Größe Druck ist dieser eine Prozeßgröße, die den aktuellen Prozeßzustand wesentlich charakterisiert (Wasserinventar im Druckbehälter). Sie ist für die Ableitung der Größen Massenfüllstand (Nahbereich) und Gemischfüllstand mittels eines Fuzzy-Modells unter der Voraussetzung der eindeutigen Erkennung des Beginns und des Endes der Druckentlastung (Störung) zur kontinuierlichen Prozeßbeobachtung geeignet. Die Detektion ist durch die Verwendung des Signals Druckstörung als Eingangsgröße gegeben (wie bei dem neuen erweiterten Fuzzy-Modell des Wärmestroms mit externer Dynamik).

Das führt zu der Idee, den Massenfüllstand (Weitbereich) als Basisgröße für die Bestimmung des Massenfüllstandes (Nahbereich) und des Gemischspiegels zu nutzen und die Aufspreizung des Massenfüllstandes (Nahbereich) und des Gemischfüllstandes gegenüber dem Massenfüllstand (Weitbereich) (Bild 5-1) mit Hilfe eines Verhältnisfaktors zu bestimmen [Fens98]. Bei der Auswahl der Struktur der Fuzzy-Modelle ist zu beachten, daß der Gemischfüllstand eine globale Größe ist, und der meßbare Massenfüllstand (Nahbereich) eine lokale Größe entsprechend des begrenzten Meßbereiches verkörpert.

Mit den Gleichungen (5.1) und (5.2) erfolgt die Definition der Verhältnisfaktoren K_n für den Massenfüllstand (Nahbereich) und K_g für den Gemischspiegel [Fens98; Trai99]. Der Verhältnisfaktor K_n charakterisiert das Verhältnis zwischen der lokalen Größe Massenfüllstand (Nahbereich) (hm_n) und der globalen Größe Massenfüllstand (Weitbereich) (hm_w).

$$K_n = \frac{hm_n}{hm_w} \quad (5.1)$$

Der Verhältnisfaktor K_g beschreibt das Verhältnis zwischen den globalen Größen Gemischfüllstand (hg) und Massenfüllstand (Weitbereich) (hm_w), die über die gesamte Behälterhöhe bestimmt werden.

$$K_g = \frac{hg}{hm_w} \quad (5.2)$$

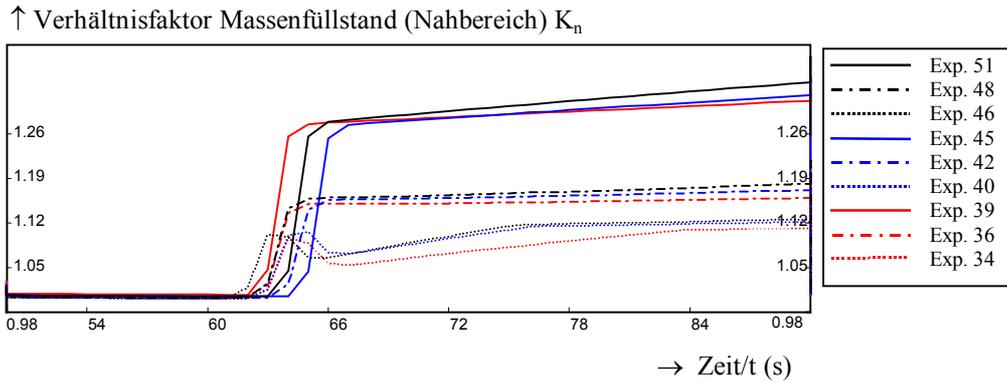


Bild 5-2: Darstellung der zeitlichen Verläufe des Verhältnissfaktors für den Massenfüllstand (Nahbereich) K_n für die Transienten der Referenzarbeitspunkte im Simulationszeitbereich $t = 50 \dots 90$ s, Experimentreihe 2, große Druckgradient

Bild 5-2 zeigt die zeitlichen Verläufe des Verhältnissfaktors für den Massenfüllstand (Nahbereich) im Ausschnitt $t = 50 \dots 90$ s des Simulationszeitbereiches für die gewählten Referenzexperimente. Gleiche Strichstärken kennzeichnen den gleichen Anfangsmassenfüllstand (Bild 5-2 und Bild 5-3). Der Verhältnissfaktor ändert sich geringfügig in Abhängigkeit der Größe Anfangsdruck bei Beginn der Störung $p_{\text{stör}_a}$, aber deutlich in Abhängigkeit der Größe Anfangsfüllstand $hm_{w_stör_a}$. Er ist zusätzlich abhängig vom maximal erreichten Druckgradienten. Der zeitliche Verlauf des Verhältnissfaktors ist während des Druckentlastungsvorganges nicht konstant, d. h. die Dynamik des Verhältnissfaktors ist zu berücksichtigen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die lokale Größe (hm_n) auf die globale Größe (hm_w) bezogen wird. Die lokale Größe (hm_n) spiegelt die Verhältnisse in dem begrenzten Nahmeßbereich wider. Die Änderung des mittleren Dampfgehaltes im Nah- und Weitbereich ist während der Experimente unterschiedlich.

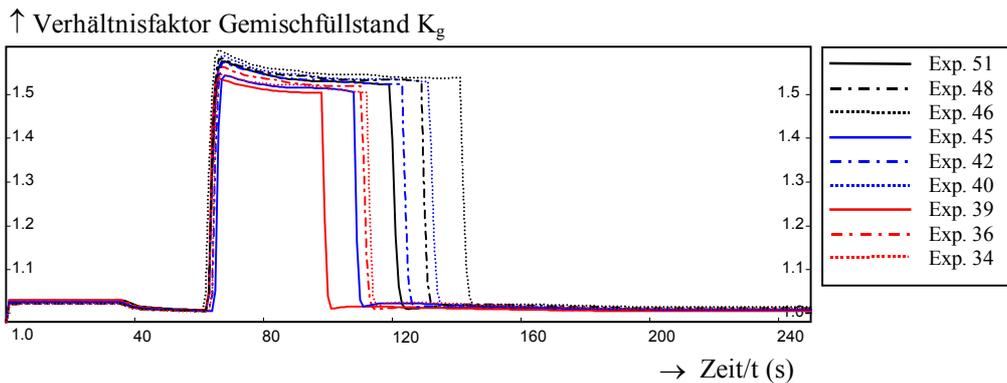


Bild 5-3: Darstellung der zeitlichen Verläufe des Verhältnissfaktors für den Gemischfüllstand K_g für die Transienten der Referenzarbeitspunkte, Experimentreihe 2, große Druckgradient

Bild 5-3 zeigt den zeitlichen Verlauf des Verhältnissfaktors für den Gemischfüllstand K_g . Der Verhältnissfaktor ändert sich nur geringfügig in Abhängigkeit der Größen Anfangsdruck und Anfangsfüllstand, ist aber abhängig vom maximal erreichten Druckgradienten. Der zeitliche Verlauf des Verhältnissfaktors ist während des Druckentlastungsvorganges nahezu konstant,

d. h. die Dynamik des Verhältnisfaktors K_g kann vernachlässigt werden. Das ist darauf zurückzuführen, daß die globale Größe Gemischfüllstand wiederum auf eine globale Größe (Massenfüllstand) bezogen wird. Das heißt, daß sich der mittlere Dampfgehalt bei jedem Experiment mit den unterschiedlichen Randbedingungen proportional zur Änderung des Bezugsfüllstandes (Anfangsfüllstand Weitbereich) verhält.

Die Verhältnisfaktoren K_n und K_g werden damit als Ausgangsgrößen der Fuzzy-Modelle definiert. Die Berechnung des Massenfüllstandes (Nahbereich) und des Gemischfüllstandes ist in zwei Etappen untergliedert:

1. fuzzy-basierter Algorithmus zur Bestimmung des Verhältnisfaktors für den Massenfüllstand (Nahbereich) K_n und für den Gemischfüllstand K_g
2. Berechnung des Massenfüllstandes (Nahbereich) hm_n

$$hm_n = K_n \cdot hm_w \quad (5.3)$$

und Berechnung des Gemischfüllstandes hg

$$hg = K_g \cdot hm_w \quad (5.4)$$

5.2.2 Eingangsgrößen

Die Nachbildung der Füllstände mittels Verhältnisfaktoren hat Auswirkungen auf die Struktur der Eingangsgrößen. Aus Bild 5-2 ist erkennbar, daß die Aufspreizung des Massenfüllstandes (Nahbereich) im wesentlichen vom Anfangsfüllstand (Weitbereich) $hm_{w_stör_a}$ abhängt. Obwohl eine Druckabhängigkeit kaum vorhanden ist, ist der Druck als Anfangswert zu Beginn der Störung $p_{stör_a}$ im Hinblick auf die unterschiedlichen Werte der Stoffdaten über den gesamten Parameterbereich einzubeziehen.

Eine weitere markante Einflußgröße ist die maximale Füllstandsänderungsgeschwindigkeit (Gradient) des Massenfüllstandes (Weitbereich). Mit abnehmendem Anfangsfüllstand wird aufgrund des geringeren Massenverlustes der Gradient des Massenfüllstandes (Weitbereich) flacher. Infolgedessen ist eine eindeutige Zuordnung des Gradienten zu dieser Größe möglich. Mit dem Signal Druckstörung werden Beginn und Ende der eintretenden Störung detektiert [Trai99].

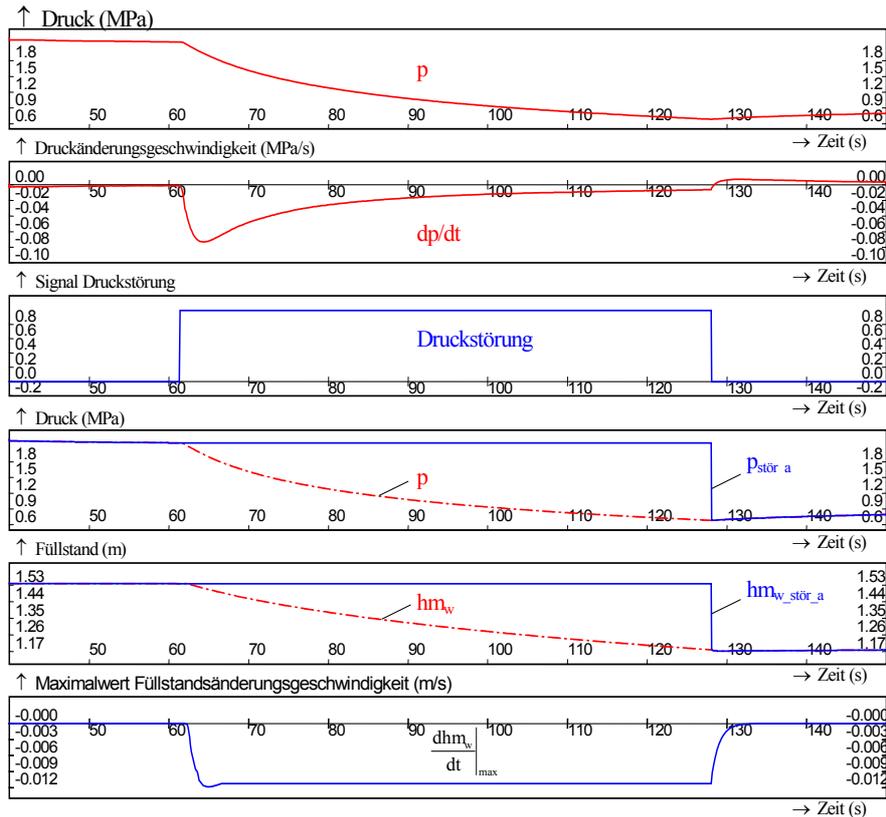


Bild 5-4: Darstellung der Meßsignale Druck $p(t)$ und Druckänderungsgeschwindigkeit dp/dt und Massenfüllstand (Weitbereich) $hm_w(t)$ sowie der daraus ermittelten Eingangsgrößen für die Fuzzy-Parallelmodelle Druckstörung, $p_{stör_a}$, $hm_{w_stör_a}$ und $\left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{max}$ für das Abblaseexperiment 48

Daraus schlußfolgernd ist die eindeutige Klassifizierung und Beschreibung der Verhältnisfaktoren mit Hilfe folgender signifikanter Prozeßparameter und Prozeßsignale vergleichbar zum Wärmestrom möglich:

- ⇒ Prozeßsignal: Druckstörung (Detektion von Beginn und Ende einer Störung)
- ⇒ Prozeßparameter: Anfangswert Druck $p_{stör_a}$
- ⇒ Prozeßparameter: Anfangswert Massenfüllstand (Weitbereich) $hm_{w_stör_a}$
- ⇒ Prozeßparameter: Maximalwert der Änderungsgeschwindigkeit des Massenfüllstandes (Weitbereich) $\left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{max}$

Diese Prozeßinformationen werden analog zur Modellierung des Wärmestroms mit generierten Algorithmen diagnostiziert, die durch klassische Logik- und Schaltoperationen gekennzeichnet sind und sich scharfer Werte und Kriterien bedienen (Anhang A 1.6). Das Bild 5-4 demonstriert beispielhaft für das Abblaseexperiment 48 die Prozeßgrößen Druck $p(t)$, Druckänderungsgeschwindigkeit dp/dt und Massenfüllstand (Weitbereich) $hm_w(t)$ sowie die Bestimmung der daraus ermittelten Prozeßsignale und Prozeßgrößen Druckstörung, $p_{stör_a}$, $hm_{w_stör_a}$ und $\left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{max}$, die als Eingangsgrößen der Fuzzy-Algorithmen dienen.

In den nächsten Abschnitten wird die Umsetzung der Struktur der Fuzzy-Parallelmodelle für die Modellierung des Massenfüllstandes (Nahbereich) und des Gemischfüllstandes im Parameterbereich der Anlage für eine kontinuierliche Prozeßbeobachtung beschrieben.

5.3 Neues Fuzzy-Parallelmodell zur Bestimmung des Massenfüllstandes (Nahbereich)

5.3.1 Struktur

Da die Experimente der Reihe 2 mit der Füllstandsmessung mit Einkammerpegelgefäß (EKPG), Meßbereich: 1,0 - 2,8 m, durchgeführt wurden, dient dieser gemessene Füllstand als Bezugsgröße für die fuzzy-basierten Algorithmen. Dies korrespondiert mit der Größe Massenfüllstand zwischen den Einbindungen des Meßsystems auch für die Experimentreihe 1 (Anhang A 1.2), die mit der Füllstandsmessung des Zweikammerpegelgefäßes (ZKPG), Meßbereich: 1,0 - 1,6 m, durchgeführt wurde. Bezogen auf das nodale Gemischraummodell mit zwei Zonen (Abschnitt 3.2, 4.1 und 4.2) entspricht das der meßbaren Zustandsgröße hm_2 . Aufgrund der unterschiedlichen unteren Einbindung (0,8 m) findet die Füllstandsmessung mit dem Nullkammerpegelgefäß (NKPG) bei der fuzzy-basierten Modellierung des Massenfüllstandes (Nahbereich) keine Berücksichtigung.

Der Gesamtprozeß ist ein nichtlinearer, dynamischer Prozeß und der Massenfüllstand (Nahbereich) eine lokale Größe. Folglich wird, wie beim Wärmestrom in Abschnitt 4.2, eine dynamische Fuzzy-Struktur in Form des Fuzzy-Modells mit externer Dynamik angewendet [Fens98; Trai99]. Im Bild 5-5 wird die Struktur des dynamischen Fuzzy-Modells mit den gewählten Ein- und Ausgangsgrößen für die Bestimmung des Verhältnisfaktors K_n und die Bestimmung des Massenfüllstandes (Nahbereich) hm_n veranschaulicht. Der aktuelle Wert des Massenfüllstandes (Nahbereich) hm_n wird über die Gleichung (5.3) berechnet [Trai99].

Die direkte Ausgangsgröße des Fuzzy-Modells ist die zeitliche Ableitung des Verhältnisfaktors Massenfüllstand (Nahbereich) $\frac{dK_n}{dt}$. Eine zweite Ausgangsgröße wird durch den Wert des Faktors zum Zeitpunkt der Aufspreizung $K_n|_s$ gebildet (s. Anhang A 1.4). Diese zweite Ausgangsgröße des Fuzzy-Modells ist erforderlich als Anfangswert für den Integrator.

Eingangsgrößen sind die Signale Druckstörung, der Anfangsdruck $p_{stör_a}$ und der Anfangsfüllstand (Weitbereich) $hm_{w_stör_a}$. Als zusätzliche Eingangsgröße kommt der Wert des fuzzy-basiert ermittelten Faktors K_n über die Rückführung hinzu. Der Maximalwert der Füllstandsänderungsgeschwindigkeit (Weitbereich) gestattet eine Klassifizierung der Leckgröße (analog zur maximalen Druckänderungsgeschwindigkeit).

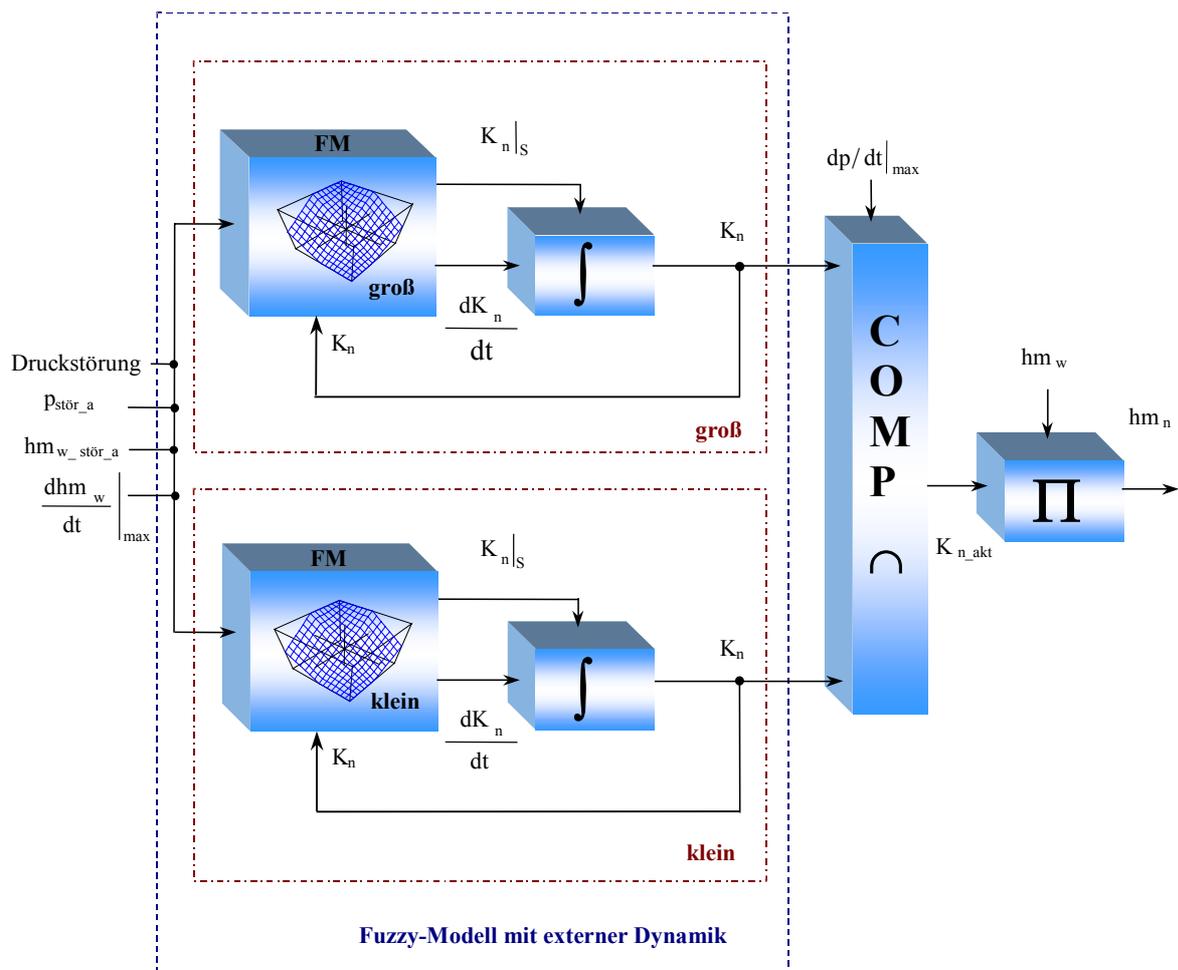


Bild 5-5: Fuzzy-Modell mit externer Dynamik zur Ermittlung des Verhältnissfaktors K_n und Berechnung des Massenfüllstandes (Nahbereich) hm_n

Diesbezüglich macht sich eine separate Auslegung des Modells für kleine und große Werte der Verhältnissfaktoren erforderlich, da für jeden Blendendurchmesser wegen der Überschneidungen einiger Werte eine separate Regelbasis aufgebaut werden muß. Demzufolge müssen die Werte für die Ausgangsgrößen K_n , $\frac{dK_n}{dt}$ und $K_n|_s$ in [klein] und [groß] getrennt werden.

5.3.2 Kennfeldumschaltung

Da für die verschiedenen Parameterbereiche (klein und groß) separate Fuzzy-Modelle entworfen werden mußten, ist auch hier zwischen den Modellen umzuschalten. Analog zum Wärmestrom wird zum Test der Funktionsfähigkeit der Algorithmen eine scharfe Kennfeldumschaltung mittels eines Kennfeldfaktors (N_{KF}) realisiert. Der Kennfeldfaktor wird mit den Werten 0 oder 1 belegt, was aussagt, welches der Kennfelder Gültigkeit besitzt ($N_{KF} \in \{0, 1\}$). Die Gleichung (5.5) zur Ermittlung des erforderlichen Verhältnissfaktors lautet:

$$K_n = N_{KF} \cdot K_{n[grö\beta]} + (1 - N_{KF}) \cdot K_{n[klein]} \quad (5.5)$$

Die Umschaltung des Faktors erfolgt mittels des Kriteriums der erreichten maximalen Druckänderungsgeschwindigkeit (Bild 5-5). Mit Hilfe des Wertes wurde ein scharfer Schwellwert definiert, anhand dessen unter Anwendung eines Komparators eindeutig klassifizierbar ist, um welche Leckgröße (hoher oder niedriger Druckgradient) es sich bei der Störung handelt. Das ist möglich, da zwischen den Werten eine eindeutige Abgrenzung getroffen werden kann.

5.3.3 Basisregel

Die Basisregel als Grundlage für das Fuzzy-Modell für den Verhältnisfaktor K_n ergibt sich nach Bild 5-5 zu Gleichung (5.6):

$$\begin{array}{l}
 \text{WENN} \quad \text{'Druckstörung'} \quad \text{UND} \quad \left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{\max} \quad \text{UND} \\
 \quad \quad \quad \text{'p_{stör_a}'} \text{ UND} \quad \text{'hm_{w_stör_a}'} \quad \text{UND} \quad \text{'K_n'} \\
 \text{DANN} \quad \left. \frac{dK_n}{dt} \right|_{\max} \quad \text{UND} \quad \text{'K_n|_s'} \quad (5.6)
 \end{array}$$

Die Parametrierung der beiden Fuzzy-Modelle für [klein] und [groß] erfolgt auf der Grundlage der Datenbasis und der Erfahrungen, die aus den Experimenten gewonnen wurden. Die Referenzdaten (signifikante Eckdaten der Experimentreihe), wie sie im Anhang A 1.2 markiert sind, liegen der Erstellung der Fuzzy-Modelle zugrunde.

5.3.4 Zugehörigkeitsfunktionen

Die Verteilung der Repräsentanten der Zugehörigkeitsfunktionen wurde entsprechend der Arbeitspunkte vorgenommen bzw. der nichtlinearen Charakteristik der Prozeßgrößen angepaßt. In den folgenden Bildern sind die definierten linguistischen Variablen, die Anzahl sowie die Verteilung (Wahl der Repräsentanten) der Zugehörigkeitsfunktionen für die Eingangsgrößen:

- ⇒ Anfangsdruck und -füllstand zu Beginn der Störung $p_{stör_a}$ und $hm_{w_stör_a}$,
- ⇒ maximal erreichter Gradient des Massenfüllstandes (Weitbereich) $\left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{\max}$ und
- ⇒ das Signal Druckstörung des Fuzzy-Modells

für beide Parameterbereiche [klein] und [groß] dargestellt.

Die anderen Fuzzy-Kenngrößen, wie Form der Zugehörigkeitsfunktion, werden analog zum Wärmestrom angewendet. Die Zugehörigkeitsfunktionen (ZGF) für den Anfangsfüllstand und -druck wurden gemäß der verwendeten Referenzexperimente erzeugt (Bild 5-6 und Bild 5-7). Die Zugehörigkeitsfunktion für den Anfangsdruck $p_{stör_a}$ weist zwar nur zwei Repräsentanten auf, ist aber notwendig zur Unterscheidung eines geringen und hohen Anfangsdruckes der Experimente.

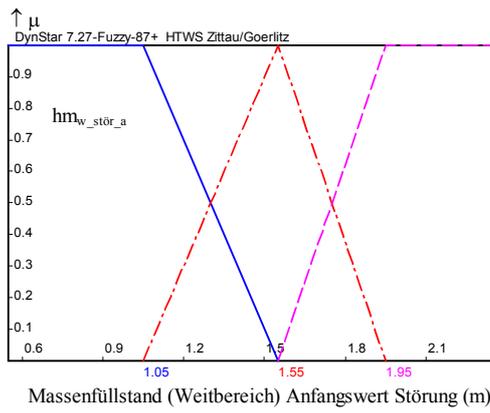


Bild 5-6: ZGF der ling. Variable Anfangsfüllstand $hm_{w_stoer_a}$

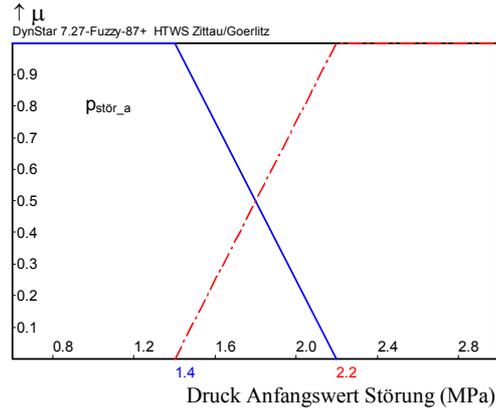


Bild 5-7: ZGF der ling. Variable Anfangsdruck p_{stoer_a}

Für das Maximum der Füllstandsänderungsgeschwindigkeit (Weitbereich) wurde abweichend zu allen anderen verwendeten linguistischen Variablen als Form der Zugehörigkeitsfunktion das Trapez gewählt, um eine Trennung in Arbeitsbereiche zu erhalten (Bild 5-8). Die Zugehörigkeitsfunktion für das Signal Druckstörung ist analog zum Wärmestrom für die Detektion des Beginns und Endes der Störung ohne Überlappung gebildet worden (Bild 5-9).

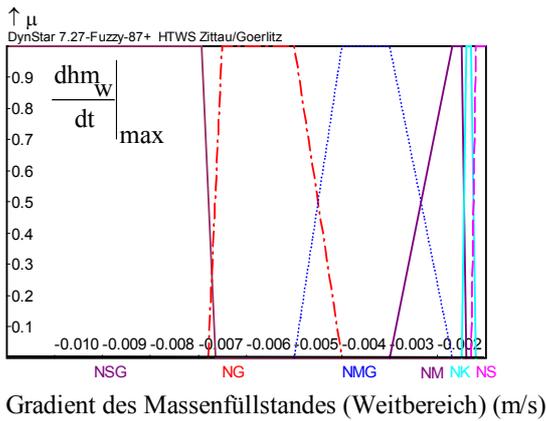


Bild 5-8: ZGF für das Maximum Änderungsgeschwindigkeit des Massenfüllstandes (Weitbereich)

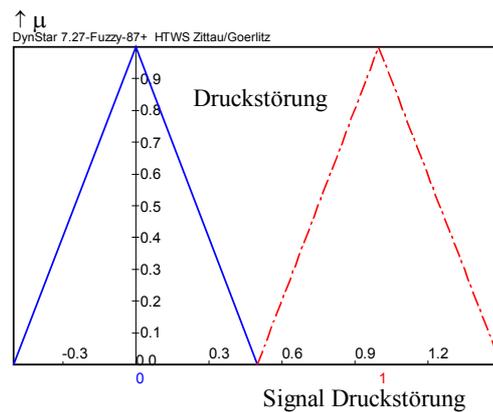


Bild 5-9: ZGF des Signals Druckstörung

Bild 5-10 und Bild 5-11 zeigen die Zugehörigkeitsfunktionen für die direkten Ausgangsgrößen des Fuzzy-Modells, die zeitliche Ableitung $\frac{dK_n}{dt}$ und den Anfangswert des Verhältnissfaktors $K_n|_S$.

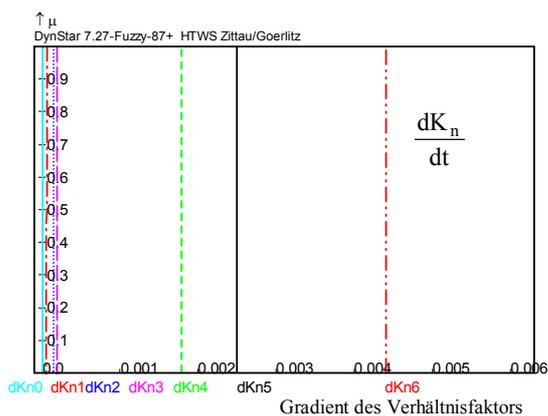


Bild 5-10: ZGF der ling. Variable
Gradient des Verhältnissfaktors $\frac{dK_n}{dt}$

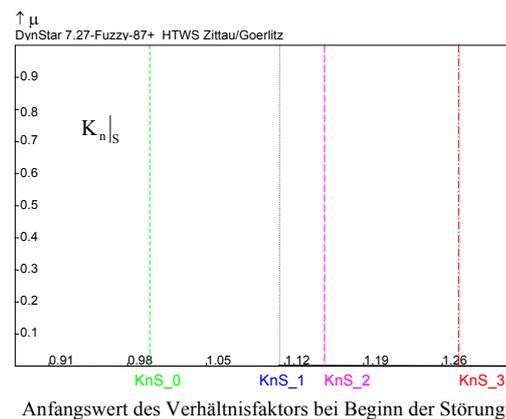


Bild 5-11: ZGF der ling. Variable
Anfangswert des Verhältnissfaktors $K_n|_S$

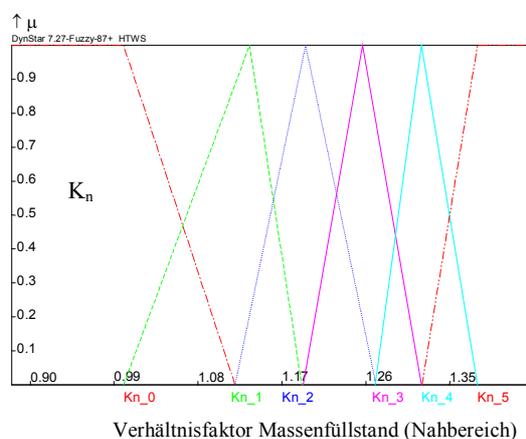


Bild 5-12: ZGF der linguistischen Variable Verhältnissfaktor K_n

Das Bild 5-12 repräsentiert die Zugehörigkeitsfunktion für den Verhältnissfaktor K_n als Ausgangsgröße der dynamischen Fuzzy-Modell Struktur. Auch hier gilt, daß für stark nicht-lineare dynamische Prozesse im Hinblick auf die Sensibilität eine höhere Anzahl von Zugehörigkeitsfunktionen für die linguistischen Variablen der Ausgangsgrößen im Vergleich zur Anzahl der Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsgrößen notwendig sind, um das Übertragungsverhalten eindeutig zu reproduzieren. Die Zugehörigkeitsfunktionen im Bild 5-10 gelten für den Bereich [groß] des Verhältnissfaktors K_n , die Zugehörigkeitsfunktionen in Bild 5-11 und Bild 5-12 für den Bereich [klein] des Verhältnissfaktors [Trai99].

5.3.5 Regelbasis

Die prozeßrelevanten Einzelregeln für die Fuzzy-Modelle wurden auf der Grundlage von Daten und Prozeßerfahrungen entsprechend der Basisregel aufgestellt und in einer Regeltabelle zusammengefaßt. Für die Beschreibung des stationären Prozeßzustandes (Signal Druckstörung = 0) wurden zusätzliche Einzelregeln verwendet, die den stationären Prozeßzustand ausreichend charakterisieren. Auszugsweise werden einige Regeln für den hohen Parameterbereich [groß] gezeigt (vollständige Liste in Programmdokumentationen und [Hamp99-1]).

WENN 'Druckstörung'='1' UND $\left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{max}$ = 'NMG' UND 'p_{stör_a}'='2.2' UND
 'hm_{w_stör_a}' = '1.55' UND 'Kn groß' = 'Kn_1'
 DANN ' $\frac{dK_n}{dt}$ '='dKn6' UND ' $K_n|_s$ ' = 'Kn_S3'
 WENN 'Druckstörung'='1' UND $\left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{max}$ = 'NSG' UND 'p_{stör_a}'='2.2' UND
 'hm_{w_stör_a}' = '1.55' UND 'Kn groß' = 'Kn_2'
 DANN ' $\frac{dK_n}{dt}$ '='dKn4' UND ' $K_n|_s$ ' = 'Kn_S2'
 WENN 'Druckstörung'='1' UND $\left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{max}$ = 'NM' UND 'p_{stör_a}'='1.4' UND
 'hm_{w_stör_a}' = '1.95' UND 'Kn groß' = 'Kn_0'
 DANN ' $\frac{dK_n}{dt}$ '='dKn6' UND ' $K_n|_s$ ' = 'Kn_S1'
 WENN 'Druckstörung'='1' UND $\left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{max}$ = 'NG' UND 'p_{stör_a}'='1.4' UND
 'hm_{w_stör_a}' = '1.95' UND 'Kn groß' = 'Kn_1'
 DANN ' $\frac{dK_n}{dt}$ '='dKn5' UND ' $K_n|_s$ ' = 'Kn_S1'
 WENN 'Druckstörung'='0' UND 'Kn groß' = 'Kn_0' DANN ' $\frac{dK_n}{dt}$ '='dKn0' UND
 ' $K_n|_s$ ' = 'Kn_S0'

5.3.6 Kennfeld

Zur Veranschaulichung des nichtlinearen Zusammenhangs werden beispielhaft die beiden resultierenden Kennfelder für den Bereich der hohen [groß] und niedrigen [klein] Druckgradienten im Bild 5-13 gezeigt. Wegen der hochdimensionalen Beziehung zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen ist eine grafische Ansicht nur als Projektion des ursprünglichen Kennfeldes in den dreidimensionalen Raum möglich. Die für die Illustration genutzten Eingangsgrößen werden, wie beim Wärmestrom, wieder variiert, zwei Eingangsgrößen werden konstant gehalten. Die konstant gehaltenen Größen sind für dieses Beispiel der Wert für $p_{stör_a} = 1,4 \text{ MPa}$ und $\left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{max} = NK$ (-0,0017 m/s). Die zweite Ausgangsgröße Anfangswert des Verhältnissfaktors $K_n|_s$ wird nicht dargestellt. Die erzeugten Kennfelder gelten für den Bereich der negativen Drucktransienten (Druckstörung = 1). Die mit dem Fuzzy-Algorithmus für den hohen (dunkel schraffiert) und niedrigen (hell schraffiert) Parameterbereich generierten Kennfelder werden übereinandergelegt. Die unsymmetrische Verteilung der Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsgrößen, wie des maximalen Gradienten des Massenfüllstandes (Weitbereich) (Bild 5-8) und die Verwendung der zeitlichen Ableitung des Verhältnissfaktors (Bild 5-10) entsprechend der nichtlinearen Prozeßcharakteristik analog der experimentellen Datenbasis, haben einen wesentlichen Einfluß auf die Deformation des Kennfeldes.

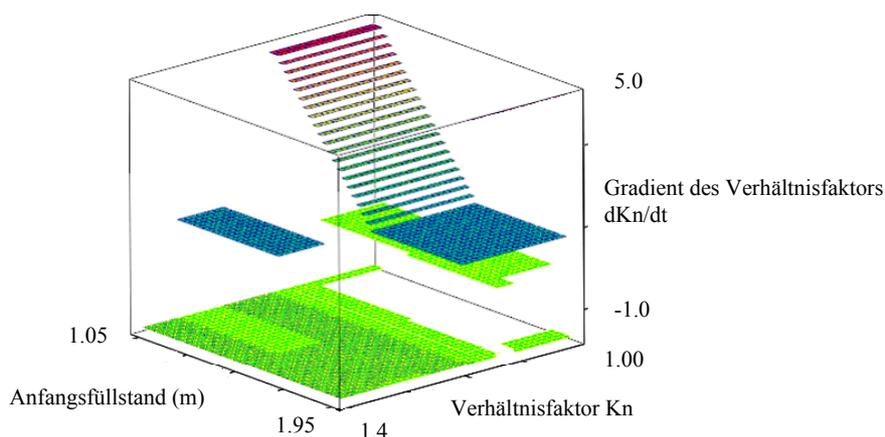


Bild 5-13: Fuzzy-Kennfeld der Änderungsgeschwindigkeit des Verhältnissfaktors $dK_n/dt = f(hm_{w_stör_a}, K_n)$ im Arbeitspunkt: $p_{stör_a} = 1.4 \text{ MPa}$; $\left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{max} = NK \text{ (-0.0017 m/s)}$ für hohe und niedrige Druckgradienten

Das ausgewählte Beispiel bildet einen Teil der Gesamregelbasis für die Änderungsgeschwindigkeit des Verhältnissfaktors dK_n/dt in Abhängigkeit der Eingangsgrößen Anfangsfüllstand $hm_{w_stör_a}$ und Verhältnissfaktor K_n . Dargestellt sind die im technischen Bereich physikalisch möglichen Parameterkombinationen, die die Stützstellen in der Regelbasis repräsentieren. Zwischen vorhandenen Leerstellen wird durch das Fuzzy-Modell linear interpoliert. Die Aufspreizung zwischen den beiden resultierenden Kennfeldern repräsentiert den Bereich, den der Prozeß auf seiner Trajektorie durchlaufen kann.

Hier zeigt sich im Gegensatz zum analytischen Modell der Vorteil des erfolgreichen Einsatzes des Fuzzy-Modells. Auf der Basis weniger vorhandener Stützstellen aus den Referenzexperimenten wird ein leistungsfähiges Modell erstellt, wo Lücken durch Erfahrungswissen ergänzt werden und zwischen den Punkten interpoliert wird. Damit sind die nichtlinearen Beziehungen zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen in dem Kennfeld abgelegt [Trai99].

5.3.7 Darstellung der Rekonstruktionsergebnisse

5.3.7.1 Nachweis der Funktionsfähigkeit

Die Ergebnisse der Rekonstruktion des Massenfüllstandes (Nahbereich) mit dem neuen fuzzy-basierten Parallelmodell werden in Bild 5-14 bis Bild 5-16 präsentiert. Zunächst werden die Ergebnisse der fuzzy-basierten Modellierung für einige repräsentative Referenzexperimente (34, 48 und 51 im hohen Parameterbereich) zum Test der Funktionsfähigkeit der Algorithmen dokumentiert. Verglichen wird die Rekonstruktion des Massenfüllstandes (Nahbereich) hm_n_FUZ mittels des fuzzy-basierten Parallelmodells mit dem gemessenen Massenfüllstand (Nahbereich) hm_n_ATH . Zusätzlich ist in den Bildern der Verlauf des Massenfüllstandes (Weitbereich) zur Illustration der Aufspreizung des Massenfüllstandes (Nahbereich) dargestellt. Der untere Teil der Bilder zeigt jeweils die Nachbildung des Verhältnissfaktors K_n mit dem Fuzzy-Modell mit externer Dynamik.

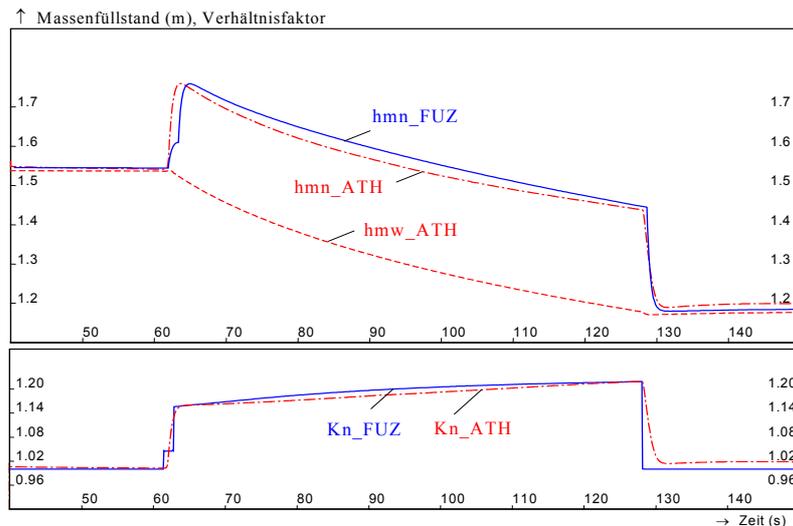


Bild 5-14: Vergleich des fuzzy-basiert rekonstruierten Verlaufs des Massenfüllstandes (Nahbereich) (hm_n _FUZ) mit dem Prozeßverlauf (hm_n _ATH) sowie des Verhältnisfaktors K_n des Fuzzy-Modells (K_n _FUZ) mit dem Prozeß (K_n _ATH) für das Abblaseexperiment 48

Für das Referenzexperiment 48 (hoher Parameterbereich) im Bild 5-14 oben wird die Aufspreizung des Massenfüllstandes (Nahbereich) gegenüber dem Massenfüllstand (Weitbereich) während der Transiente mittels der fuzzy-basierten Berechnung des Verhältnisfaktors sehr gut nachgebildet. Damit werden auch der zeitliche Verlauf des Massenfüllstandes (Nahbereich) und die Dynamik des Prozesses korrekt wiedergegeben. Im Verlauf der Transiente liegt der relative Fehler bezogen auf den Prozeß hm_n _ATH für das Fuzzy-Parallelmodell bei ca. 6 %, was als hinreichend genau betrachtet werden kann. Die hohe Güte der Rekonstruktion des Füllstandes ist bedingt durch die sehr gute Rekonstruktion des Verhältnisfaktors im Bild 5-14 unten. Die Stufe zu Beginn der Druckentlastung entsteht durch die Umschaltung der zweiten Ausgangsgröße Anfangswert des Verhältnisfaktors zu Beginn der Störung $K_n|_S$, was aber keinen wesentlichen Einfluß auf die Rekonstruktion des Massenfüllstandes (Nahbereich) ausübt.

Im Bild 5-15 oben ist ebenfalls zu erkennen, daß der Prozeßverlauf des Massenfüllstandes (Nahbereich) (hm_n _ATH) mit dem Fuzzy-Modell (hm_n _FUZ) für das Abblaseexperiment 34 gut nachgebildet wird. Hierbei handelt es sich um ein Experiment mit Meßbereichsüberschreitung (Nahbereich) durch den Gemischfüllstand, erkennbar an der Begrenzung und der Plateauausbildung des Verlaufes der Prozeßgröße hm_n _ATH kurz nach Beginn der Störung. Der Massenfüllstand (Nahbereich) wird mit dem Parallelmodell entsprechend des realen Prozesses so rekonstruiert, als wenn keine Meßbereichseinschränkung vorliegen würde. Zum Vergleich der beiden Verfahren hier und aus Abschnitt 4.2 ist der mit dem hybriden nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachter (hm_n _h_BEO) rekonstruierte Verlauf des Massenfüllstandes (Nahbereich) für dieses Experiment dargestellt. Dieser folgt dem Prozeß und zeigt den Nachteil der Rückkopplung des Fehlers, was sich wie bei hm_n _ATH durch die Begrenzung äußert. Für die kontinuierliche Prozeßbeobachtung heißt das bei gleichzeitigem Einsatz des Hybridbeobachters und des fuzzy-basierten Parallelmodells Umschaltung auf das

fuzzy-basierte Parallelmodell für den Massenfüllstand (Nahbereich) und den Gemischfüllstand bei Verlassen des Meßbereiches.

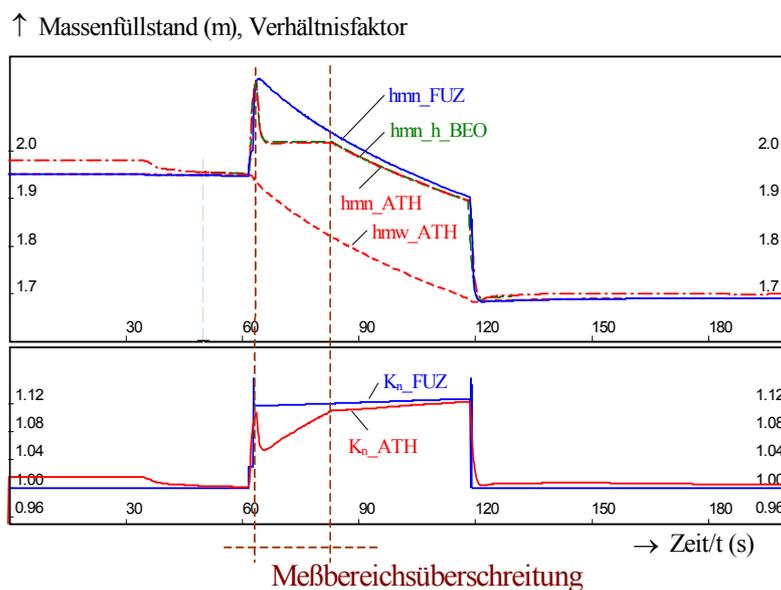


Bild 5-15: Vergleich des fuzzy-basiert rekonstruierten Verlaufs des Massenfüllstandes (Nahbereich) (h_{mn_FUZ}) mit dem Prozeßverlauf (h_{mn_ATH}) und des Verhältnissfaktors K_n des Fuzzy-Modells (K_{n_FUZ}) mit dem Prozeß (K_{n_ATH}), Experiment 34 sowie Kennzeichnung der Zeit der Meßbereichsüberschreitung

Im Bild 5-15 unten ist ersichtlich, daß die Berechnung des Verhältnissfaktors K_{n_ATH} für dieses Experiment durch das Fuzzy-Modell K_{n_FUZ} entsprechend des realen Prozesses richtig wiedergegeben wird, da das Fuzzy-Modell keiner Meßbereichsbegrenzung unterliegt. Die Spitzen entstehen zum einen durch die Umschaltung der Kennfelder bei Beginn und Ende der Störung (numerische Effekte bei der Simulation), zum anderen durch die gleichzeitige Aktivierung mehrerer Regeln bezüglich der zweiten Ausgangsgröße $K_n|_S$. Auf die Rekonstruktion des Massenfüllstandes (Nahbereich) haben diese Spitzen keine Auswirkung.

Das Bild 5-16 zeigt ähnliche Ergebnisse wie das Bild 5-15. Bei dem Abblaseexperiment 51 (hohe Druckänderungsgeschwindigkeit) ist die Meßbereichsüberschreitung der unteren Meßbereichsgrenze ($<1,0$ m) am Plateau erkennbar (Ausbildung eines konstanten Wertes an der unteren Meßbereichsgrenze). Das nicht begrenzte fuzzy-basierte Parallelmodell zeigt den Verlauf des Massenfüllstandes (Nahbereich) ohne Meßbereichsüberschreitung und folgt somit richtigerweise dem realen gemessenen Verlauf des Massenfüllstandes (Weitbereich). Der relative Fehler zur Meßgröße Massenfüllstand (Nahbereich) h_{mn_ATH} liegt für die Referenzexperimente zum rekonstruierten Füllstand h_{mn_FUZ} im gesamten Beobachtungszeitraum mit einem guten Ergebnis zwischen 5 % und 7 % im Maximum. Ausgenommen ist davon der Bereich der Meßbereichsüber- oder unterschreitung, in dem auf das Parallelmodell umzuschalten ist, da dieses den tatsächlichen, wahren Füllstand in dem Fall richtig wiedergibt.

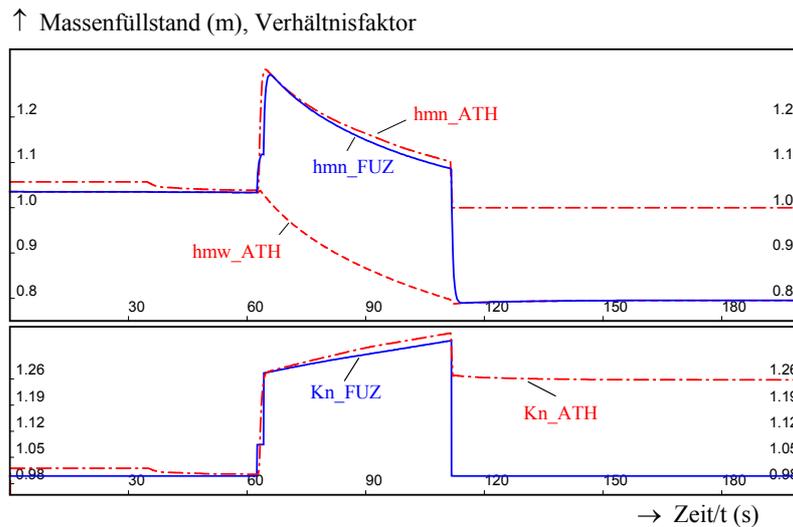


Bild 5-16: Vergleich des fuzzy-basiert rekonstruierten Verlaufs des Massenfüllstandes (Nahbereich) (hm_n _FUZ) mit dem Prozeßverlauf (hm_n _ATH) sowie des Verhältnisfaktors K_n des Fuzzy-Modells (K_n _FUZ) mit dem Prozeß (K_n _ATH), Experiment 51

5.3.7.2 Gültigkeitsbereich des Parallelmodells

Um den weiteren Nachweis des Gültigkeitsbereiches des neuen fuzzy-basierten Parallelmodells für den Massenfüllstand (Nahbereich) zu führen, wurden Daten aus Experimenten der Reihe 1 und 2 mit niedrigen und hohen Druckänderungsgeschwindigkeiten getestet. Das heißt, daß für unbekannte Transienten innerhalb des Fuzzy-Kennfeldes eine Interpolation bzw. Extrapolation erfolgen muß. Diese Transienten (Bild 5-17) dienen der Verifikation der Algorithmen mit unbekanntem Anfangsbedingungen.

Dargestellt sind zum Vergleich jeweils der Massenfüllstand (Nahbereich) des Prozesses hm_n _ATH und der mittels des Fuzzy-Parallelmodells rekonstruierte Füllstand hm_n _FUZ. Die Rekonstruktionsgüte zur Ermittlung des Massenfüllstandes (Nahbereich) ist zufriedenstellend, der relative Fehler liegt für alle Testdaten im Bereich der Transiente (Druckstörung = 1) bei maximal 10 %, was als gutes Ergebnis gewertet werden kann. Zu berücksichtigen ist, daß bei den ersten drei Transienten wiederum eine Meßbereichsunterschreitung (Ausbilden von Plateaus) nach dem Ende des Abblasens vorliegt.

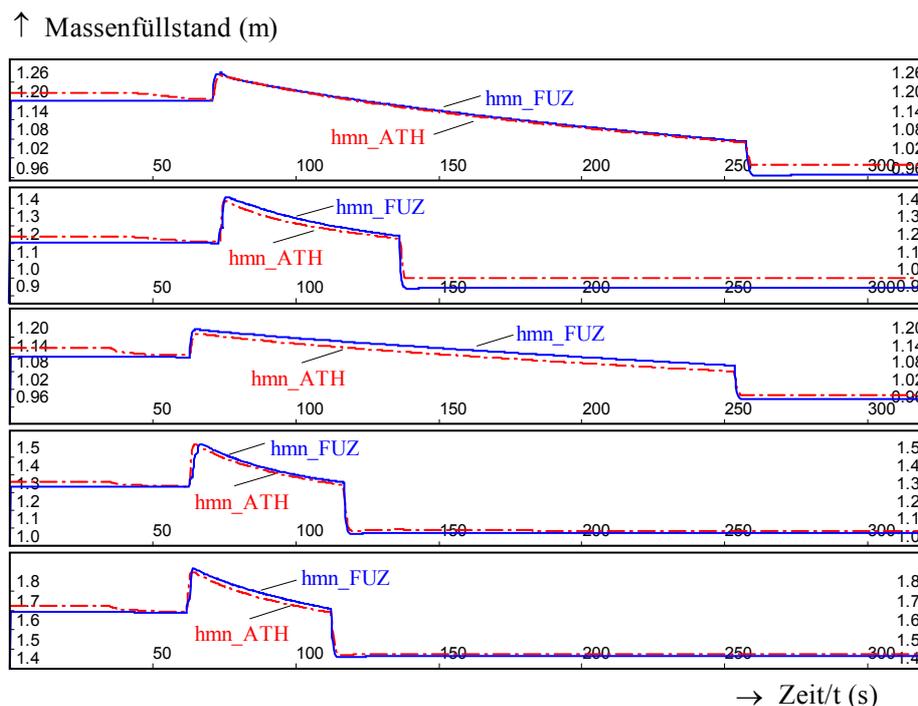


Bild 5-17: Vergleich des fuzzy-basiert rekonstruierten Verlaufs des Massenfüllstandes (Nahbereich) (hm_n_FUZ) mit dem Prozeßverlauf (hm_n_ATH) für die Abblaseexperimente 3, 9, 20, 41 und 43 (von oben)

Es ist festzustellen, daß die fuzzy-basierten Modelle für den Massenfüllstand (Nahbereich) in dem betrachteten, d. h. für die Versuchsanlage relevanten Parameterbereich, gute Ergebnisse bei der Simulation aufweisen. Auf diese Weise existiert zum Hybridbeobachter eine weitere, auf der Basis von Meßgrößen generierte, redundante Modellinformation für den Einsatz in der kontinuierlichen Prozeßbeobachtung. Damit ist die Anwendbarkeit des neuen fuzzy-basierten Parallelmodells mit externer Dynamik für die Rekonstruktion des Massenfüllstandes (Nahbereich) im Falle von Meßbereichsüberschreitungen oder Meßsystemausfällen während negativer Drucktransienten gegeben.

5.4 Neues Fuzzy-Parallelmodell zur Bestimmung des Gemischfüllstandes

5.4.1 Struktur

Die bisherige Berechnung des Gemischfüllstandes erfolgte auf der Grundlage eines analytischen Modellkonzeptes (Abschnitt 3.2, 4.1). Das neue fuzzy-basierte Modell des Gemischfüllstandes ist aufbauend auf den Ein- und Ausgangsgrößen des Modells des Massenfüllstandes (Nahbereich) zu realisieren. Nach Abschnitt 5.2 ist im Unterschied zum Verhältnisfaktor K_n der zeitliche Verlauf des Verhältnisfaktors K_g aufgrund der globalen Charakteristik des Gemischfüllstandes während des Druckentlastungsvorganges nahezu konstant (Bild 5-3), d. h. die Dynamik des Verhältnisfaktors kann vernachlässigt werden. Da der Verhältnisfaktor K_g abhängig von der maximal erreichten Druckänderungsgeschwindigkeit ist, sind trotz der geringfügigen Abhängigkeit von den Größen Anfangsdruck $p_{stör_a}$ und Anfangsfüllstand

$hm_{w_stör_a}$ diese Größen als Eingangsgrößen zur Unterscheidung des niedrigen und hohen Parameterbereiches erforderlich.

Die nichtlineare Dynamik des Prozesses (Aufschäumen durch Dampfentstehung), d. h. die Aufspreizung des Gemischfüllstandes gegenüber dem Massenfüllstand (Weitbereich) während der Druckentlastung wird durch den Verhältnisfaktor für den Gemischfüllstand K_g beschrieben. Aufgrund der Vernachlässigung der Dynamik von K_g wird abgeleitet, daß ein klassisches Fuzzy-Modell für die Rekonstruktion des Gemischfüllstandes ausreichend ist (s. auch Datenanalyse Anhang A 1.4) [Trai99].

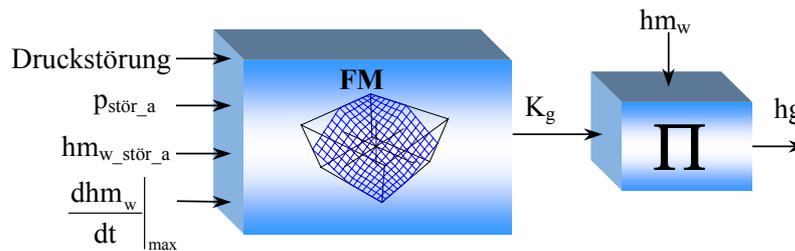


Bild 5-18: Fuzzy-Modell zur Ermittlung des Verhältnisfaktors K_g und Berechnung des Gemischfüllstandes h_g

Im Bild 5-18 wird das Fuzzy-Modell mit den gewählten Ein- und Ausgangsgrößen für die Bestimmung des Gemischfüllstandes veranschaulicht. Die Ausgangsgröße des Fuzzy-Modells ist der Verhältnisfaktors K_g nach Gleichung (5.2), der zur Berechnung des aktuellen Wertes für den Gemischfüllstand h_g genutzt wird.

Die Eingangsgrößen werden gemäß dem Modell für den Verhältnisfaktor K_n verwendet. Eine separate Auslegung des Modells für geringe und hohe Verhältnisfaktoren macht sich in diesem Fall nicht erforderlich, da eine eindeutige Unterscheidung des Verhältnisfaktors K_g gegeben ist. Der gesamte Parameterbereich für die Referenzexperimente kann somit in einem Fuzzy-Kennfeld abgelegt werden.

5.4.2 Basisregel

Die Basisregel für das Fuzzy-Modell ergibt sich nach Bild 5-18 entsprechend der verwendeten Ein- und Ausgangsgrößen zu Gleichung (5.7):

$$\begin{aligned} &\text{WENN 'Druckstörung' UND 'p_{stör_a}' UND 'hm_{w_stör_a}' UND} \\ &\left. \left(\frac{dhm_w}{dt} \right)_{\max} \right\} \\ &\text{DANN 'K_g'} \end{aligned} \quad (5.7)$$

5.4.3 Zugehörigkeitsfunktionen

In Bild 5-19 bis Bild 5-21 sind die Definition der linguistischen Variablen, die Anzahl und die Verteilung der Zugehörigkeitsfunktionen für die Ein- und Ausgangsgrößen des Fuzzy-

Modells dargestellt. Die Zugehörigkeitsfunktionen für den Anfangsfüllstand $hm_{w_stör_a}$ und den Anfangsdruck $p_{stör_a}$ wurden gemäß der verwendeten Experimente (Referenzarbeitspunkte) erstellt. Die Zugehörigkeitsfunktionen für den Anfangsfüllstand $hm_{w_stör_a}$ und das Signal Druckstörung sind analog dem Fuzzy-Modell für den Verhältnisfaktor des Massenfüllstandes (Nahbereich) gewählt. Den Zugehörigkeitsfunktionen für $p_{stör_a}$ wurde im Gegensatz zur Modellierung des Füllstandes (Nahbereich) ein Repräsentant hinzugefügt. Die Form der Zugehörigkeitsfunktionen ist für das Maximum der Füllstandsänderungsgeschwindigkeit (Weitbereich) wieder das Trapez [Trai99].

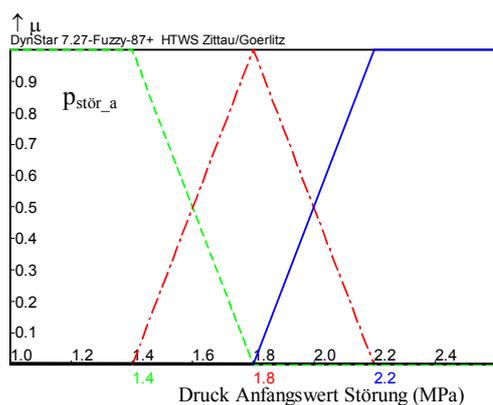


Bild 5-19: ZGF der ling. Variable Anfangsdruck $p_{stör_a}$

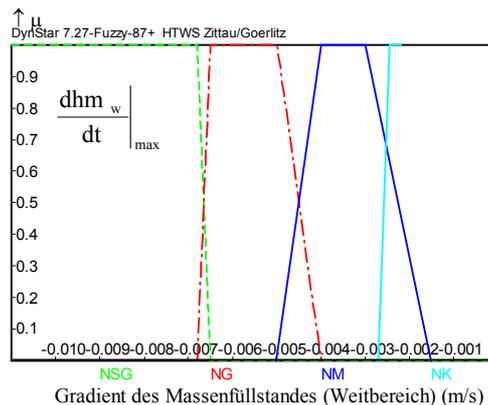


Bild 5-20: ZGF der ling. Variable Max. der Füllstandsänderungsgeschwindigkeit (Weitbereich)

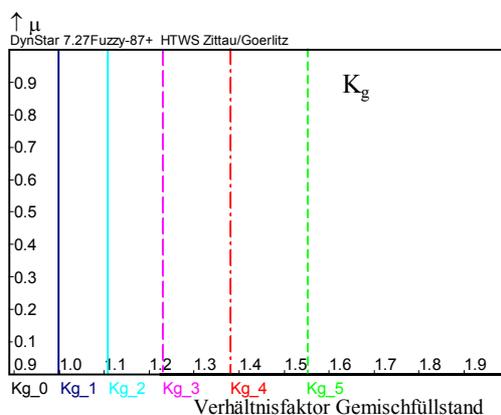


Bild 5-21: ZGF der linguistischen Variable Verhältnisfaktor K_g

Entsprechend der Erfahrungen und Ergebnisse der Datenanalyse wurde gemäß der Referenzexperimente eine geringe Anzahl der Zugehörigkeitsfunktionen und eine symmetrische Verteilung der Repräsentanten für die Ausgangsgröße K_g des klassischen Fuzzy-Modells gewählt (Bild 5-21).

5.4.4 Regelbasis

Anhand der Struktur des Fuzzy-Modells und der Basisregel sowie der Definition der linguistischen Variablen und deren Zugehörigkeitsfunktionen wird die Regelbasis mit den Einzelregeln erstellt. Die prozeßrelevanten Einzelregeln für das Fuzzy-Modell wurden auf der

Grundlage der experimentellen Datenbasis sowie Prozeßverfahren entsprechend der Basisregel aufgestellt und in einer Regeltabelle zusammengefaßt. Der Auszug aus den Einzelregeln im verwendeten Simulationsprogramm (Anhang A 3.4) veranschaulicht den Aufbau der Regelbasis im Bereich der negativen Drucktransienten. Für die Beschreibung des stationären Prozeßzustandes (Signal Druckstörung = 0) wurde zur Vereinfachung eine zusätzliche, sogenannte unvollständige Einzelregel auf der Basis der wesentlichen Information ($K_g = 0$) verwendet. In dem Fall ist der Gemischfüllstand in etwa gleich dem Wert des Massenfüllstandes (Weitbereich). Der Prozeßzustand wird dadurch ausreichend charakterisiert.

WENN 'Druckstörung' = '1' UND $\left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{max}$ = 'NK' UND $p_{stör_a}$ = '1.4' UND
 $hm_{w_stör_a}$ = '1.05' DANN 'Kg' = 'Kg_2'

WENN 'Druckstörung' = '1' UND $\left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{max}$ = 'NSG' UND $p_{stör_a}$ = '1.8' UND
 $hm_{w_stör_a}$ = '1.05' DANN 'Kg' = 'Kg_5'

WENN 'Druckstörung' = '1' UND $\left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{max}$ = 'NM' UND $p_{stör_a}$ = '1.4' UND
 $hm_{w_stör_a}$ = '1.55' DANN 'Kg' = 'Kg_3'

WENN 'Druckstörung' = '1' UND $\left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{max}$ = 'NG' UND $p_{stör_a}$ = '2.2' UND
 $hm_{w_stör_a}$ = '1.95' DANN 'Kg' = 'Kg_3'

WENN 'Druckstörung' = '1' UND $\left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{max}$ = 'NG' UND $p_{stör_a}$ = '1.8' UND
 $hm_{w_stör_a}$ = '1.95' DANN 'Kg' = 'Kg_4'

Unvollständige Einzelregel:

WENN 'Druckstörung' = '0' DANN 'Kg' = 'Kg_0'

5.4.5 Kennfeld

Analog zur Vorgehensweise im Abschnitt 5.3.6 für den Massenfüllstand (Nahbereich) wird das aus der Regelbasis resultierende 5-dimensionale Kennfeld durch konstante Vorgaben für einzelne Eingangsgrößen in eine dreidimensionale Darstellung projiziert. Das Bild 5-22 zeigt einen Teil des gesamten Kennfeldes für den Verhältnissfaktor K_g in Abhängigkeit der Eingangsgrößen Anfangsfüllstand $hm_{w_stör_a}$ und Anfangsdruck $p_{stör_a}$ im Arbeitspunkt $\left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{max} = NM$. Die Kennfelder gelten für den Fall der plötzlichen Druckentlastung (Druckstörung = 1) [Trai00].

Durch die Verwendung des klassischen Fuzzy-Modells und die annähernde Gleichverteilung der 3 bis 5 Zugehörigkeitsfunktionen werden diese Kennfelder nicht so stark deformiert wie bei dem Modell für den Massenfüllstand (Nahbereich). Das heißt, die Übertragungsfunktion des Fuzzy-Kennfeldes ist mit mehr Plateaus besetzt. Zwischen den Stützstellen, die durch die Referenzexperimente gebildet werden, wird mit dem Fuzzy-Modell linear interpoliert.

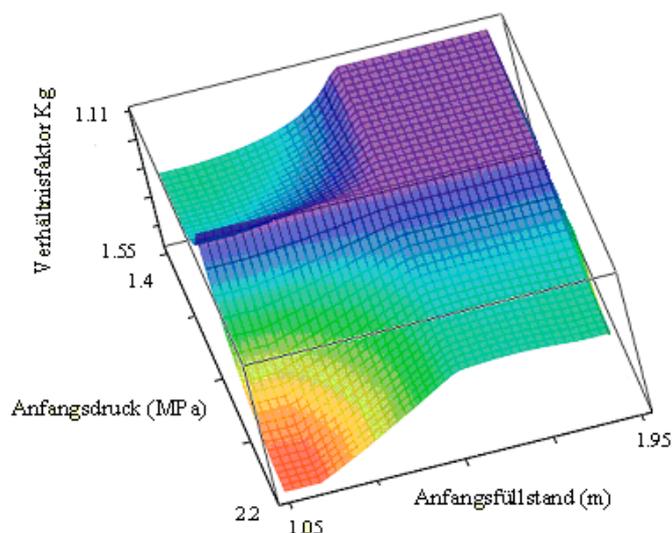


Bild 5-22: Fuzzy-Kennfeld des Verhältnissfaktors $K_g = f(hm_{w_stör_a}, p_{stör_a})$ für

$$\left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{max} = NM$$

In [Chak96] wurde auch darauf hingewiesen, daß für klassische, statische Fuzzy-Modell drei bis fünf Zugehörigkeitsfunktionen zur eindeutigen Beschreibung der Nichtlinearitäten des Prozesses ausreichen, was mit dem vorliegenden Anwendungsfall unterstrichen werden kann.

5.4.6 Darstellung der Rekonstruktionsergebnisse

5.4.6.1 Nachweis der Funktionsfähigkeit

Bild 5-23 bis Bild 5-25 präsentieren die Ergebnisse der Nachbildung des Verhältnissfaktors K_g mittels des fuzzy-basierten Parallelmodells (K_g_FUZ) und die darauf aufbauende Ermittlung des Gemischfüllstandes (hg_FUZ). Gezeigt wird die Rekonstruktion der fuzzy-basiert ermittelten Größen für ausgewählte Experimente (Referenzarbeitspunkte) mit der kleinen und großen Blende, die der Generierung des Fuzzy-Modells zugrunde lagen.

Im Vergleich mit dem realen Prozeß wird eine gute Rekonstruktion des Gemischfüllstandes hg_ATH (Bild jeweils oben) und des Verhältnissfaktors K_g_ATH (Bild jeweils unten) im gesamten Beobachtungszeitraum vor, während und nach der Druckstörung mit dem Fuzzy-Modell (K_g_FUZ , hg_FUZ) erreicht. Die Stufen zu Beginn der Druckentlastung (Aufschäumen) entstehen durch die Umschaltung und lineare Interpolation zwischen den wenigen Stützstellen des Verhältnissfaktors, was aber keinen wesentlichen Einfluß auf die Rekonstruktion des Gemischfüllstandes ausübt. Der maximale relative Rekonstruktionsfehler, der auf den Prozeß bezogen wird, liegt für alle Referenzexperimente im Verlauf der Transiente mit einem sehr guten Ergebnis unter der 5 %-Marke. Die Dynamik des Prozesses wird für alle Beispiele sehr gut wiedergegeben. Damit wird eine hohe Qualität der Rekonstruktion erzielt. Auf diese Weise ist die Anwendbarkeit des fuzzy-basierten Parallelmodells für die Rekonstruktion des Gemischfüllstandes nachgewiesen.

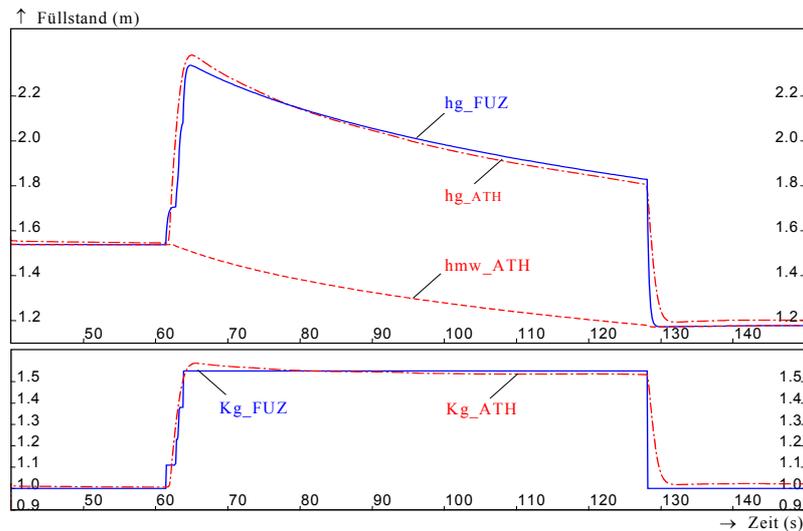


Bild 5-23: Vergleich des fuzzy-basiert rekonstruierten Verlaufs des Gemischfüllstandes (Nahbereich) (hg_{FUZ}) mit dem Prozeßverlauf (hg_{ATH}) und des Verhältnissfaktors K_g des Fuzzy-Modells (K_g_{FUZ}) mit dem Prozeß (K_g_{ATH}), Experiment 48, hoher Druckgradient

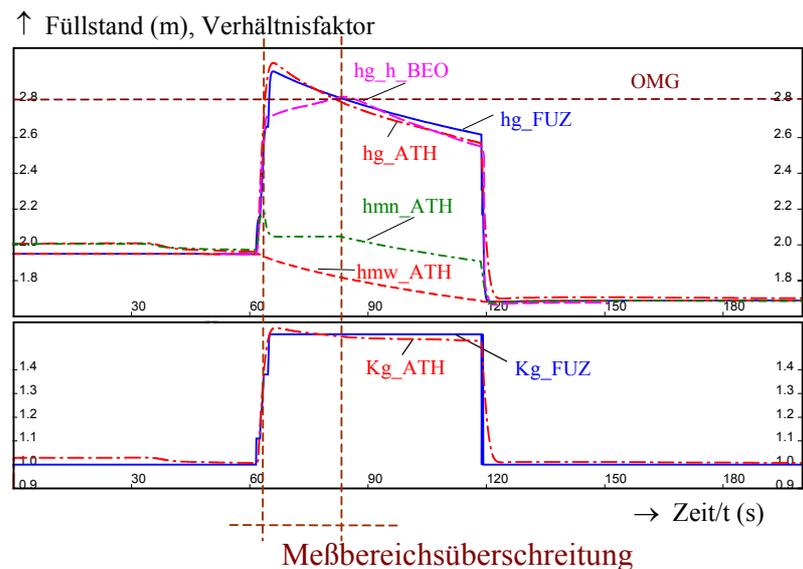


Bild 5-24: Vergleich des fuzzy-basiert rekonstruierten Verlaufs des Gemischfüllstandes (Nahbereich) (hg_{FUZ}) mit dem Prozeßverlauf (hg_{ATH} , hmn_{ATH} , hmw_{ATH}) und dem Hybridbeobachter ($hg_{h_{BEO}}$) sowie des Verhältnissfaktors K_g des Fuzzy-Modells (K_g_{FUZ}) mit dem Prozeß (K_g_{ATH}), Experiment 34, hoher Druckgradient sowie Kennzeichnung der Meßbereichsüberschreitung

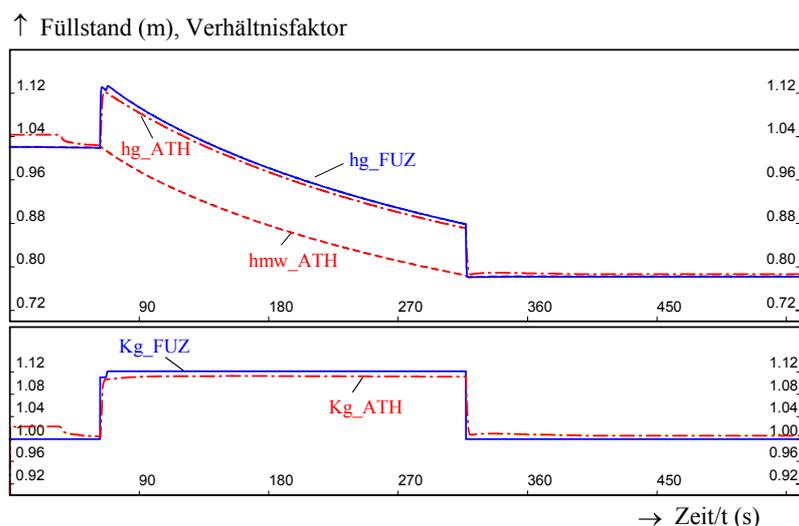


Bild 5-25: Vergleich des fuzzy-basiert rekonstruierten Verlaufs des Gemischfüllstandes (Nahbereich) (hg_FUZ) mit dem Prozeßverlauf (hg_ATH) und des Verhältnisfaktors K_g des Fuzzy-Modells (K_g_FUZ) mit dem Prozeß (K_g_ATH), Experiment 33, kleiner Druckgradient

5.4.6.2 Gültigkeitsbereich des Parallelmodells

Um den Gültigkeitsbereich des fuzzy-basierten Parallelmodells für den Gemischfüllstand im technologischen Parameterbereich der Versuchsanlage nachzuweisen, wurden Gemischfüllstandsrekonstruktionen mit weiteren Datensätzen aus Experimenten der Reihe 1 und 2 (niedriger und hoher Druckgradient) und Simulationsrechnungen (ATHLET-Code) realisiert. Dieses wird auch hinsichtlich einer Extrapolation ($p_{z0} = 2,4$ MPa) durchgeführt. Mit den Simulationen zur Verifikation wird die Leistungsfähigkeit des fuzzy-basierten Parallelmodells für den Gemischfüllstand demonstriert.

Eine Auswahl der Simulationen der Transienten mit den unbekanntenen Anfangszuständen zeigt das Bild 5-26. Die Simulationen des Verhältnisfaktors K_g und des Gemischfüllstandes hg lieferten für alle Datensätze zufriedenstellende Ergebnisse. Die Dynamik des Verlaufes des Gemischfüllstandes während der Störung (Abblasen) wird gut rekonstruiert. Die Abweichungen zu dem durch den ATHLET-Code repräsentierten Prozeß sind als akzeptabel einzuschätzen. Der relative Rekonstruktionsfehler zum Prozeß beträgt im Maximum ca. 10 % für alle getesteten Datensätze.

Das neue Fuzzy-Parallelmodell für den Gemischfüllstand ist auf der Grundlage der generierten Regeln und des damit erzeugten Kennfeldes in der Lage, die für die Ermittlung des Verhältnisfaktors erforderlichen Zwischengrößen zu interpolieren. Damit wird die Interpolationsfähigkeit der für die Fuzzy-Algorithmen verwendeten Kenngrößen nachgewiesen. Die Anwendbarkeit des neuen fuzzy-basierten Parallelmodells mit externer Dynamik wird für die Rekonstruktion des Gemischfüllstandes im Falle von Meßbereichsüberschreitungen oder Meßsystemausfällen ebenfalls bestätigt. Auf eine weitere Optimierung der Fuzzy-Modelle und der dazugehörigen Kennfelder hinsichtlich der Anzahl und der Verteilung

der Repräsentanten der Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Variablen wurde für beide Fuzzy-Parallelmodelle an der Stelle verzichtet.

Die Bewertung der Güte und der Vergleich der beiden Verfahren fuzzy-basiertes Parallelmodell und hybrider nichtlinearer Beobachter zur Gemischfüllstandsbestimmung wird anhand der Kopplung der beiden modellgestützten Meßverfahren im Abschnitt 6.3 vorgenommen.

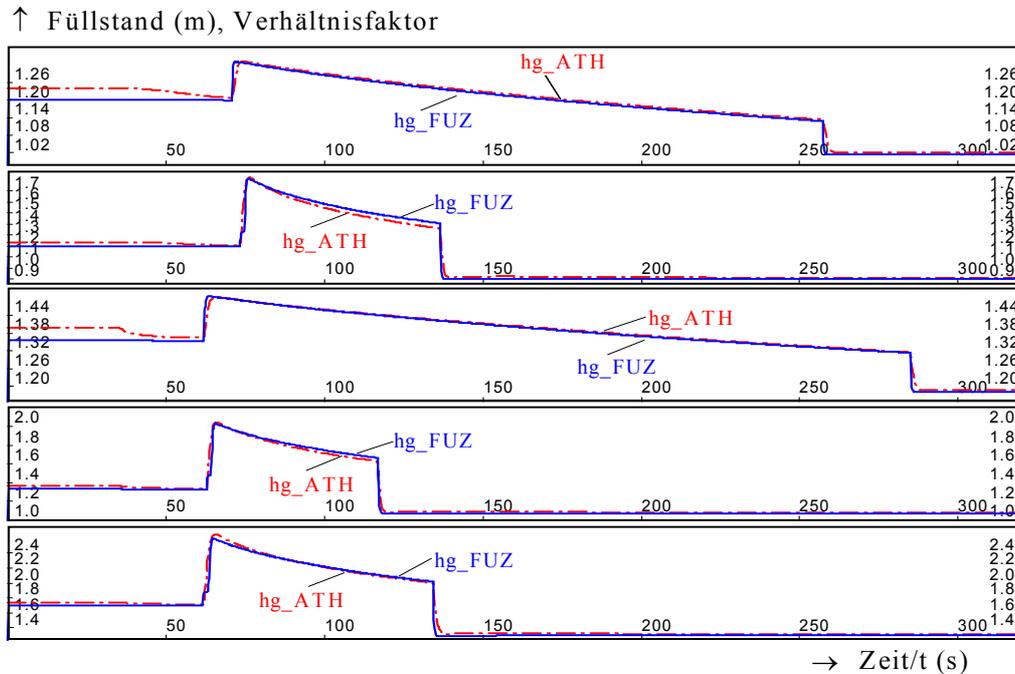


Bild 5-26: Vergleich des fuzzy-basiert rekonstruierten Verlaufs des Gemischfüllstandes (hg_FUZ) mit dem Prozeßverlauf (hg_ATH) für die Abblaseexperimente 5, 6, 19, 43, 47 (von oben)

5.5 Bewertung und Schlußfolgerungen

Die Intention der neuen Fuzzy-Parallelmodelle liegt darin, eine kontinuierliche Prozeßbeobachtung des Füllstandes durch Bereitstellung von Informationen über zusätzliche nichtmeßbare Prozeßgrößen und den Prozeßzustand auf der Basis der neuen Verfahren der analytischen Redundanz zu gewährleisten. Die Generierung der fuzzy-basierten Parallelmodelle für den Gemischfüllstand und den Massenfüllstand (Nahbereich) erfolgt im Rahmen der Entwicklung fortgeschrittener modellgestützter Meßverfahren. Ziel ist die Bereitstellung einer zuverlässigen Meßinformation bei negativen Drucktransienten auf der Grundlage der möglichen Modellredundanzen. Einen Teil davon bildet die Generierung der fuzzy-basierten Parallelmodelle mit dem Ziel des Einsatzes als Redundanz der Füllstandsmessung.

Für die Generierung von fuzzy-basierten Parallelmodellen können zusammenfassend folgende Ergebnisse formuliert werden:

1. erfolgreicher Einsatz der Verfahren des Soft Computing (Fuzzy-Set Theorie) zur Generierung der fuzzy-basierten Parallelmodelle,
2. erfolgreicher Einsatz fuzzy-basierter Modelle auf der Basis von Verhältnisfaktoren bezogen auf den direkt meßbaren Massenfüllstandes (Weitbereich) für die Rekonstruktion des Füllstandes während störungsbedingter Übergangsvorgänge in nichtlinearen, dynamischen Prozessen,
3. Fuzzy-Modell mit externer Dynamik für die Bestimmung des Massenfüllstandes (Nahbereich),
4. klassisches Fuzzy-Modell für die Bestimmung des Gemischfüllstandes,
5. Realisierung der Funktionsfähigkeit der Fuzzy-Algorithmen beider Modelle für verschiedene Experimentreihen im gesamten Parameterbereich der Druckbehälterversuchsanlage auch im Fall der Meßbereichsüber- oder -unterschreitung und des Meßsystemausfalls (Nahbereich),
6. Lieferung eines Beitrages zur Methodik der Wahl der Eingangsgrößen für eine Modellierung des Füllstandes in Druckbehältern mit Verfahren des Soft Computing,
7. hohe Rekonstruktionsgüte für Transienten (Referenzdatensätze), deren Datensätze der Erstellung der Fuzzy-Modell zugrunde lagen,
8. hinreichend genaue Rekonstruktionsgüte für Transienten mit unbekanntem Anfangszuständen (Datensätze zur Verifikation),
9. Eignung des Programmsystems DynStar mit Fuzzy-Shell für die Simulation der Parallelmodelle.

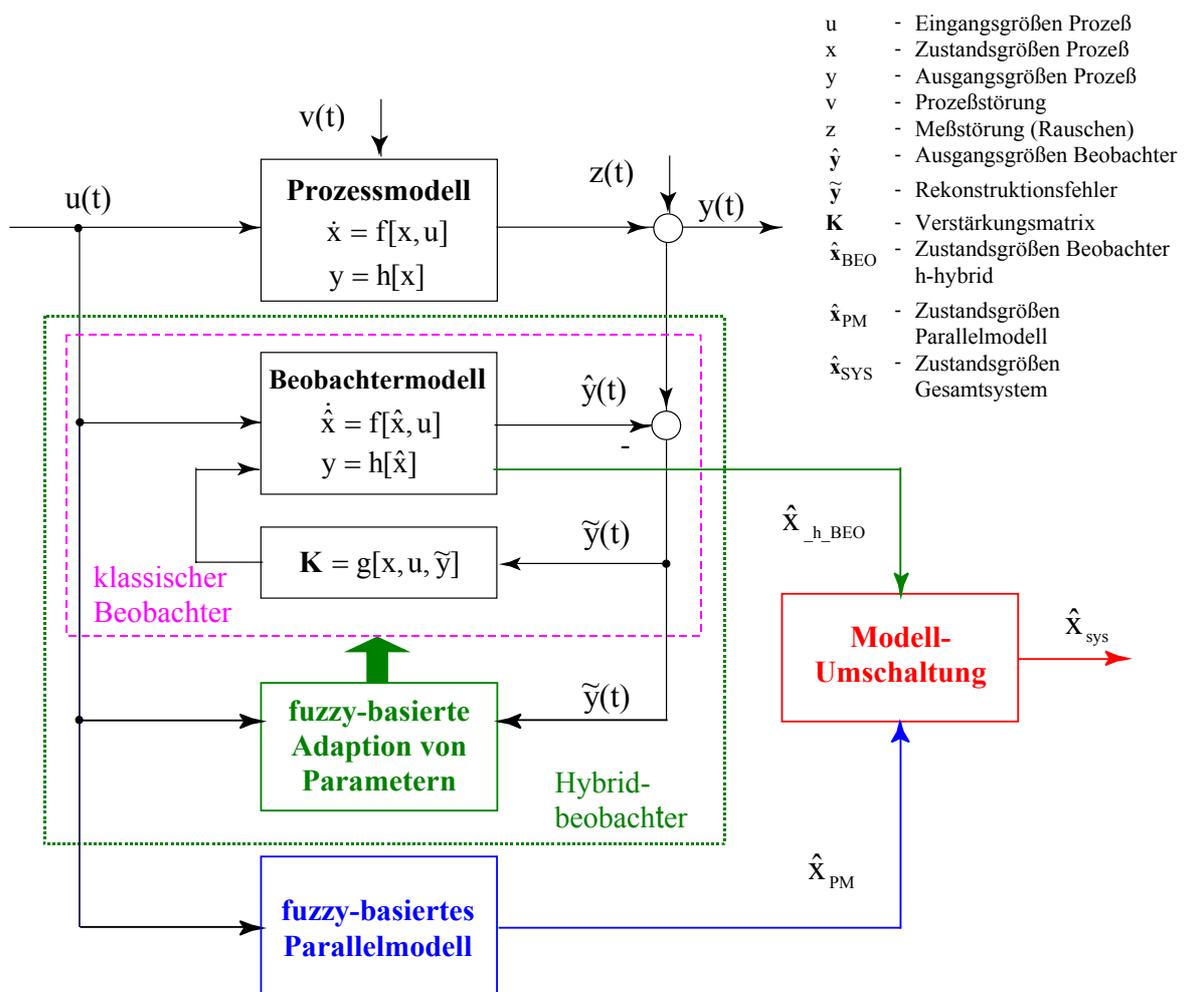
Die Kopplung der neu entwickelten modellgestützten Meßverfahren zur Modellierung des Füllstandes in Kapitel 4 und 5 erfolgt in Kapitel 6 im Rahmen des entwickelten Konzeptes zur kontinuierlichen Prozeßbeobachtung durch Kombination der Modellredundanzen mittels eines Modellumschaltalgorithmus.

6 Neues Konzept der kontinuierlichen Prozeßbeobachtung

6.1 Beschreibung des Konzeptes

Eine kontinuierliche Prozeßbeobachtung anhand des Füllstandes im Fall negativer Drucktransienten mittels analytischer Redundanz erfordert den gleichzeitigen Einsatz der neuen fortgeschrittenen modellgestützten Meßverfahren mit und ohne Rückkopplung für unterschiedliche Gültigkeitsbereiche auf der Grundlage der neu entwickelten Modellansätze [Fens98]. Dafür wurden folgende Modelle entwickelt und verifiziert:

- ⇒ Massenfüllstand (Nahbereich),
 - hybrider nichtlinearer PI-Arbeitspunkt-Beobachter,
 - fuzzy-basiertes Parallelmodell,
- ⇒ Gemischfüllstand,
 - fuzzy-basiertes Parallelmodell.



- u - Eingangsgrößen Prozeß
- x - Zustandsgrößen Prozeß
- y - Ausgangsgrößen Prozeß
- v - Prozeßstörung
- z - Meßstörung (Rauschen)
- \hat{y} - Ausgangsgrößen Beobachter
- \tilde{y} - Rekonstruktionsfehler
- K - Verstärkungsmatrix
- \hat{x}_{BEO} - Zustandsgrößen Beobachter h-hybrid
- \hat{x}_{PM} - Zustandsgrößen Parallelmodell
- \hat{x}_{SYS} - Zustandsgrößen Gesamtsystem

Bild 6-1: Konzept der modellgestützten kontinuierlichen Prozeßbeobachtung [Hamp99-1]

Im Bild 6-1 ist das Konzept der kontinuierlichen Prozeßbeobachtung veranschaulicht. Dargestellt ist das Gesamtsystem zur Beobachtung des Prozesses anhand der zur Verfügung stehenden Füllstandssignale, die mit Hilfe der neu entwickelten Modelle ermittelt werden. Das Gesamtsystem besteht somit aus den nachstehenden Komponenten:

1. hybrider nichtlinearer PI-Arbeitspunkt-Beobachter (auch Hybridbeobachter)

- Abschnitt 4.2: klassischer nichtlinearer Beobachter kombiniert mit fuzzy-basierter Wärmestrommodellierung (meßbarer (hm_n , hm_2) und nichtmeßbarer (hm_1) Massenfüllstand (Nahbereich) und darauf aufbauend Berechnung des Gemischfüllstandes hg)

2. fuzzy-basiertes Parallelmodell

- Kapitel 5: fuzzy-basiertes Parallelmodell für den Massenfüllstand (Nahbereich) hm_n und den Gemischfüllstand hg

3. Modellumschaltung

- Kapitel 6: fuzzy-basierte Umschaltung zwischen den Modellredundanzen mittels dafür entwickelter Algorithmen

Die Eingangsgrößen $u(t)$ in das System sind die meßbaren Größen am Druckbehälter: Druck p , Massenfüllstand (Weitbereich) hm_w . Für den Hybridbeobachter kommt noch der Massenfüllstand (Nahbereich) hm_2 bezogen auf das nodale Gemischraummodell mit zwei Zonen als Meßgröße hinzu. Weitere Eingangsgrößen sind die in Kapitel 4 und 5 beschriebenen, aus den Meßgrößen abgeleiteten Größen. Tabelle 6-1 zeigt noch einmal die konkrete charakteristische Erläuterung der Größen und Parameter aus Bild 6-1 für das Konzept der Modellumschaltung entsprechend der Prozeßspezifik (Anwendungsbeispiel) in einer Übersicht.

Tabelle 6-1: Erläuterung der Modell- und Prozeßgrößen entsprechend der Spezifik des Anwendungsbeispiels

u	Eingangsgrößen	Druck, Druckänderungsgeschwindigkeit, Anfangsdruck, Anfangsfüllstand
x	Zustandsgrößen	Meßbare und nichtmeßbare Füllstände
v	Deterministische Einflüsse	Hohe Temperaturunterschiede (Wärmestrom)
z	Stochastische Störung	Meßrauschen
y	Ausgangsgrößen	Meßbarer Füllstand
$x_{h \text{ BEO}}$	Zustandsgrößen Hybridbeobachter	Massenfüllstände Nahbereich
x_{PM}	Zustandsgrößen Fuzzy- Parallelmodell	Gemischfüllstand
x_{sys}	Zustandsgrößen Gesamtsystem	Berechneter Füllstand aus der Modellumschaltung

Die fuzzy-basierte Adaption bezieht sich auf die physikalische Größe Wärmestrom in Abschnitt 4.2. Der Verstärkungsterm K , hier dargestellt als Funktion in Abhängigkeit von den

Zustandsgrößen, Eingangsgrößen und dem Rekonstruktionsfehler, wird für den hier verwendeten PI-Arbeitspunkt-Beobachter konstant gewählt. Unter Zusammenfügung der Komponenten stellt das Gesamtsystem als Ausgangsgröße aktuelle Werte für den anliegenden Massenfüllstand (Nahbereich) und den Gemischfüllstand bereit, hier als \hat{x}_{SYS} bezeichnet.

6.2 Algorithmen zur Modellumschaltung

6.2.1 Verfahren zur Kombination der Modelle

Im folgenden wird ein eigens entwickeltes Verfahren beschrieben, das die im Grundsatz verschiedenen Modelle zur Berechnung des Massenfüllstandes (Nahbereich) und des Gemischfüllstandes zu einem kontinuierlich arbeitenden Modellgestützten Meßverfahren z. B. im Fall von Meßbereichsüber- und -unterschreitungen vereint [Fens98; Hamp99-1]. Die Bereitstellung eines kontinuierlichen Prozeßsignals für den Füllstand (berechneter Füllstand h_{BER}) erfolgt mit Hilfe eines Algorithmus zur Umschaltung zwischen dem nichtlinearen Parallelmodell (h_{PM}) und dem nichtlinearen hybriden Beobachtermodell (Hybridbeobachter, $h_{\text{h_BEO}}$). Das Bild 6-2 veranschaulicht die Umschaltung zwischen den verschiedenen Modellredundanzen in einer vereinfachten Darstellung (Ausschnitt aus Bild 6-1).

Im Falle einer Meßbereichsüber- bzw. -unterschreitung sind die Gleichungen (6.1) für die kontinuierliche Beobachtung anzuwenden [Fens98]:

WENN	Meßbereichsüberschreitung	DANN	$h_{\text{BER}} = h_{\text{PM}}$	
WENN	Meßbereich (innerhalb)	DANN	$h_{\text{BER}} = h_{\text{h_BEO}}$	(6.1)
WENN	Meßbereichsunterschreitung	DANN	$h_{\text{BER}} = h_{\text{PM}}$	

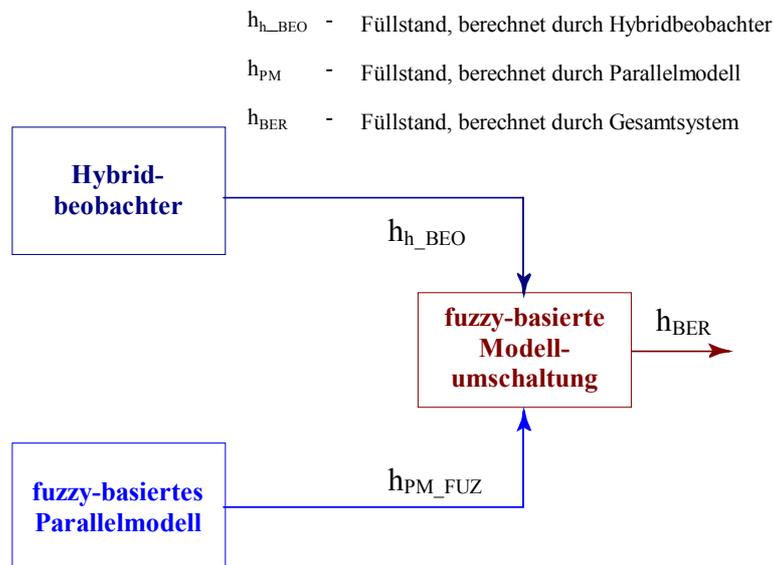


Bild 6-2: Modellumschaltung zwischen zwei Modellredundanzen

Zur Erfüllung der Zielstellung, der Anwendung der Methoden des Soft Computing, wird eine fuzzy-basierte, stoßfreie Modellumschaltung realisiert. Durch einen dem modellgestützten Meßverfahren nachgeschalteten Fuzzy-Algorithmus wird der Gültigkeitsbereich des aktiven

modellgestützten Meßverfahrens analysiert und bei Verlassen des Arbeits- bzw. Gültigkeitsbereiches erfolgt die Umschaltung anhand eines Schwellwertes auf die andere Variante. Die im Programmsystem DynStar enthaltenen Funktionsblöcke werden genutzt, um abhängig vom Überschreiten der Meßbereichsgrenzen durch das Referenzsignal (untere Meßbereichsgrenze 1,0 m, obere Meßbereichsgrenze 2,8 m) den berechneten Füllstand h_{BER} zu bestimmen.

6.2.2 Bestimmung der Umschaltkriterien

Die Problematik der Modellumschaltung besteht in der Wahl eines geeigneten Kriteriums und der Schwellwerte. Für die Detektion der Meßbereichsüberschreitung wird der mit Hilfe der Verfahren der analytischen Redundanz (fuzzy-basiertes Parallelmodell) berechnete Gemischfüllstand herangezogen. Aus der ODER-Verknüpfung der berechneten Gemischfüllstände h_{PM} und h_{h_BEO} wird nach Gleichung (6.2) ein Referenzsignal gebildet, das die Meßbereichsüberschreitung detektiert und als Kriterium für das Umschalten fungiert.

$$\text{WENN } h_{PM} > h_{oE} \quad \text{ODER} \quad h_{h_BEO} \geq h_{oE} \quad \text{DANN Meßbereichsüberschreitung} \quad (6.2)$$

Für die Detektion der Meßbereichsunterschreitung durch den Gemischfüllstand nach Gleichung (6.3) werden weitere vorhandene Prozeßsignale genutzt. Anhand der Druckänderungsgeschwindigkeit dp/dt wird detektiert, ob eine Störung in Form einer negativen Drucktransiente vorliegt, die zu einem deutlichen Aufschäumen des Gemischfüllstandes führen kann. Ist dies der Fall, dann sind ein abfallender Massenfüllstandsverlauf (Weitbereich) (hm_w) in Verbindung mit einem nahezu konstanten Verlauf des angezeigten Massenfüllstandes (Nahbereich) (hm_n) oberhalb der unteren Meßbereichsgrenze ein Indiz dafür, daß der Gemischfüllstand den Meßbereich unterschritten hat. Der Verlauf des angezeigten Massenfüllstandes (Nahbereich) (hm_n) ist konstant entlang der unteren Meßbereichsgrenze.

$$\begin{aligned} \text{WENN } dp/dt \ll 0 \quad \text{UND} \quad dh_{m_w}/dt < 0 \quad \text{UND} \quad dh_{m_n}/dt \approx 0 \quad \text{UND} \quad hm_n \approx h_{uE} \\ \text{DANN} \quad \text{Meßbereichsunterschreitung} \quad (hg < h_{uE}) \end{aligned} \quad (6.3)$$

6.2.3 Umschaltfaktor

Die Bewertung, welches Modell zur Berechnung des Füllstandes zur Anwendung kommt, wird mit Hilfe eines Modellfaktors vorgenommen, der für einen gleitenden Übergang zwischen den Modellvarianten sorgt. Dieser Faktor wichtet den Anteil, mit dem die Modelle für die Berechnung des Füllstandes wirksam werden. Die Füllstände werden mit Hilfe des Parallelmodells und des hybriden nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachters (s. vorhergehende Kapitel) berechnet. Der aktuelle Füllstand wird mit Hilfe des Modellfaktors nach der Gleichung (6.4) berechnet:

$$h_{BER} = F_{MOD} \cdot h_{PM} + (1 - F_{MOD}) \cdot h_{h_BEO} \quad (6.4)$$

Es gilt :

$$\begin{aligned} \text{WENN } F_{MOD} = 1,0 \quad \text{DANN } h_{BER} = h_{PM} \\ \text{WENN } F_{MOD} = 0,5 \quad \text{DANN } h_{BER} = 0,5 \cdot (h_{PM} + h_{h_BEO}) \\ \text{WENN } F_{MOD} = 0,0 \quad \text{DANN } h_{BER} = h_{BEO} \end{aligned} \quad (6.5)$$

6.2.4 Fuzzy-Modell für die Umschaltung

6.2.4.1 Ein- und Ausgangsgrößen und Struktur

Die Realisierung des fuzzy-basierten Algorithmus erfolgt mit Hilfe eines 2D-Fuzzy-Modells [Hamp99-1]. Ausgangsgröße ist der Modellfaktor F_MOD , der für die stoßfreie Umschaltung genutzt wird (Bild 6-3). Eingangsgrößen sind die linguistischen Variablen

- ⇒ UMG (untere Meßbereichsgrenze, $UMG = h_{uE} = 1,0$ m) und
- ⇒ OMG (obere Meßbereichsgrenze, $OMG = h_{oE} = 2,8$ m).

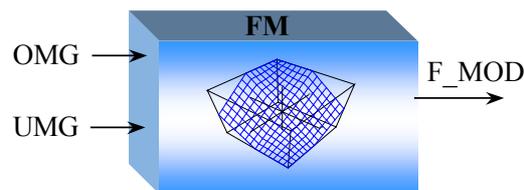


Bild 6-3: Struktur des 2D-Modells für die fuzzy-basierte Umschaltung

6.2.4.2 Zugehörigkeitsfunktionen

Für die Ein- und Ausgangsgrößen des Fuzzy-Modells sind jeweils Zugehörigkeitsfunktionen mit drei Repräsentanten und lambda-förmigen Zugehörigkeitsfunktionen definiert. Für den Wert Grenze (G) der linguistischen Variablen UMG und OMG wurde jeweils die Meßbereichsgrenze als Repräsentant definiert (Bild 6-4 und Bild 6-5). Die Repräsentanten der Werte Unterhalb (U) und Oberhalb (O) sind in Abhängigkeit der maximal auftretenden Abweichung zwischen Parallelmodell und Beobachter zu wählen. Für den Modellfaktor werden die Werte im Intervall $[0, 1]$ definiert (Bild 6-6).

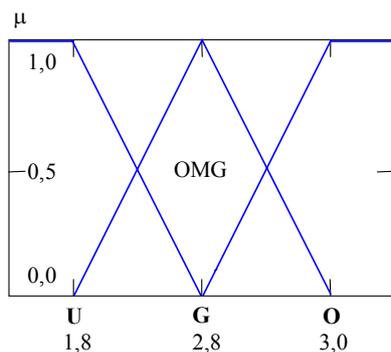


Bild 6-4: ZGF für die untere Meßbereichsgrenze UMG

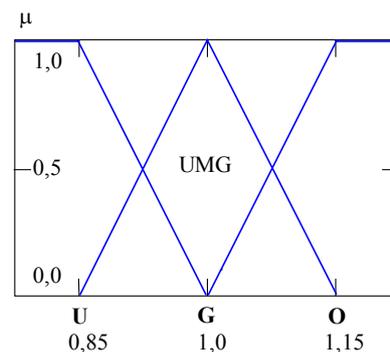


Bild 6-5: ZGF für die obere Meßbereichsgrenze OMG

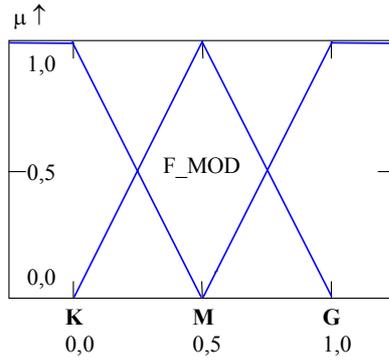


Bild 6-6: Zugehörigkeitsfunktionen für den Modellfaktor F_MOD des Fuzzy-Modells

6.2.4.3 Basisregel

Die Basisregel des Fuzzy-Modells lautet mit Gleichung (6.6):

$$\text{WENN 'UMG' UND 'OMG' DANN 'F_MOD'} \quad (6.6)$$

6.2.4.4 Regelbasis

Zur Erzielung des gewünschten Umschaltverhaltens werden folgende Einzelregeln entsprechend der Prozeßkenntnis aufgestellt:

- WENN 'UMG'='U' UND 'OMG'='U' DANN 'F_MOD'='G'
- WENN 'UMG'='G' UND 'OMG'='U' DANN 'F_MOD'='M'
- WENN 'UMG'='O' UND 'OMG'='U' DANN 'F_MOD'='K'
- WENN 'UMG'='O' UND 'OMG'='G' DANN 'F_MOD'='M'
- WENN 'UMG'='O' UND 'OMG'='O' DANN 'F_MOD'='G'

Tabelle 6-2 zeigt die vollständige Regelbasis des Fuzzy-Modells. Die hervorgehobenen Matrixpositionen kennzeichnen die genannten Einzelregeln. Die restlichen Regeln kompletieren die Regelbasis und resultieren aus logischen Zusammenhängen.

Tabelle 6-2: Regelbasis zur Bestimmung des Modellfaktors F_MOD aus den linguistischen Variablen untere (UMG) und obere Meßbereichsgrenze (OMG)

F_MOD	OMG		
	U	G	O
U	G	G	G
UMG G	M	M	G
O	K	M	G

6.2.4.5 Kennfeld

Das aus der Regelbasis resultierende Fuzzy-Kennfeld mit dem entsprechenden Übertragungsverhalten für den Modellfaktor F_MOD in Abhängigkeit der Eingangsgrößen OMG und UMG zeigt das Bild 6-7.

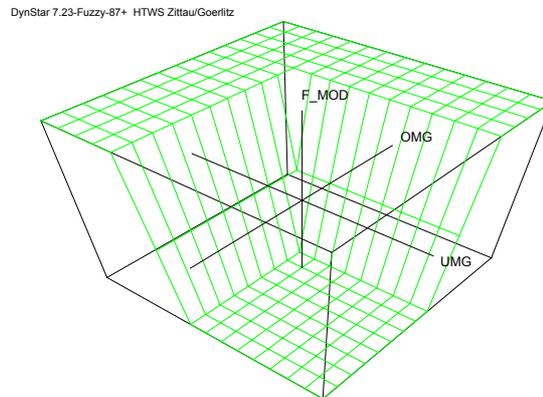


Bild 6-7: Kennfeld für das Fuzzy-Modell des Umschaltfaktors ($F_MOD = f(OMG, UMG)$)

6.3 Nachweis der Funktionalität der Umschaltalgorithmen zur Gemischfüllstandsbestimmung

Für den Nachweis der Funktionsfähigkeit der Umschaltalgorithmen zur kontinuierlichen Prozeßbeobachtung mittels des Füllstandes wird beispielhaft das Abblaseexperiment 34 (Meßbereichüberschreitung durch den Gemischfüllstand) aus der Reihe von Untersuchungen ausgewählt. Weitere umfangreiche Tests und Verifikation der Algorithmen zur Modellumschaltung, z.B. anhand des Massenfüllstandes (Nahbereich), sind in [Fens98; Hamp99-1] enthalten.

Aus der allgemeinen Füllstandsbezeichnung h im Umschaltverfahren wird für das Beispielexperiment 34 (hoher Parameterbereich) die Bezeichnung für den Gemischfüllstand hg . Im Bild 6-8 oben sind der Prozeßverlauf des Gemischfüllstandes (hg_ATH) und des Massenfüllstandes (Nahbereich) (hm_n_ATH) zum Vergleich dargestellt. Letzterer ist wegen der Überschreitung durch die Begrenzung des Füllstandes im Simulationszeitbereich von ca. $t = 60 \dots 85$ s (Umschaltbereich) gekennzeichnet. Die Rekonstruktion mittels des hybriden nichtlinearen Beobachters (hg_h_BEO) weist im Umschaltbereich einen Fehler von 30 cm im Maximum zum Prozeß auf, was hinsichtlich der Sicherheitsrelevanz des Prozeßsignals inakzeptabel ist. Bei dem Abblaseexperiment 34 wird deshalb bei Überschreitung der oberen Meßbereichsgrenze ($OMG = h_{oE} = 2,8$ m) durch den Gemischfüllstand zwischen dem Gemischfüllstandsverlauf des Parallelmodells (hg_PM_FUZ) und des hybriden Beobachters (hg_h_BEO) umgeschaltet (Bild 6-8, oben).

Im Bild 6-8 unten wird der ermittelte Verlauf für den berechneten Gemischfüllstand bei Überschreitung der oberen Meßbereichsgrenze des Massenfüllstandes (Nahbereich) (hm_n_ATH) durch den Gemischfüllstand mittels des fuzzy-basierten Umschaltalgorithmus illustriert. Mit Hilfe der fuzzy-basierten Modellumschaltung (hg_BER_FUZ) wird ein stoßfreier Übergang

zwischen den beiden Gemischfüllstandsverläufen von Parallelmodell und Beobachter realisiert. Dies ist deutlich im Vergleich zu einem mit einem klassischen Umschaltalgorithmus ermittelten Verlauf (hg_BER_K) zu sehen, der nicht stoßfrei ermittelt wird. Im Ergebnis der Modellumschaltung ist eine kontinuierliche Bestimmung des Gemischfüllstandes bei Meßbereichsüber- und -unterschreitungen mittels analytischer Redundanz auf der Basis der entwickelten modellgestützten Meßverfahren erfolgreich ermöglicht worden.

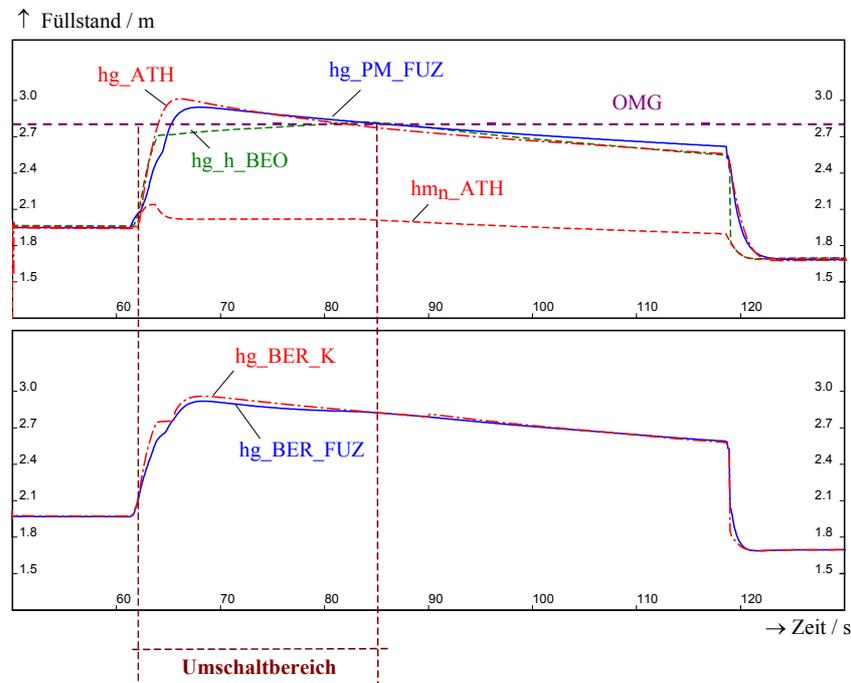


Bild 6-8: Bestimmung des Gemischfüllstandes mittels fuzzy-basierter (hg_BER_FUZ) und klassischer (hg_BER_K) Modellumschaltung aus den rekonstruierten Gemischfüllständen des Parallelmodells (hg_PM) und des Hybridbeobachters (hg_h_BEO) für das Abblaseexperiment 34

6.4 Bewertung und Schlußfolgerungen

1. Für die Umschaltung zwischen Parallelmodell und Beobachteralgorithmus wurde ein Algorithmus auf der Basis eines 2D-Fuzzy-Modells entwickelt, der auf der Bestimmung eines Modellfaktors zur Bewertung der Gültigkeit der zwei Modellvarianten beruht. Die Modellumschaltung mit fuzzy-basierten Algorithmen ermöglicht ein stoßfreies Umschalten zwischen verschiedenen Modellvarianten.
2. Prinzipiell ist der Algorithmus zur Modellumschaltung so ausgelegt, daß die entwickelten modellgestützten Meßverfahren (Hybridbeobachter und fuzzy-basiertes Parallelmodell) parallel arbeiten. Beim Erkennen von starken Abweichungen und bei Meßbereichsüber- und -unterschreitungen sowie Meßsystemausfall wird der Bewertungsalgorithmus in Form der Umschaltung aktiviert, so daß in jedem Fall ein bewertetes Füllstandssignal in Form des Massenfüllstandes (Nahbereich) und des Gemischfüllstandes für die Prozeßüberwachung zur Verfügung steht.

3. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit des Algorithmus erfolgte für den Fall der Ermittlung des Gemischfüllstandsignals bei Überschreitung des oberen Meßbereiches des Nahbereichsmeßsystems durch den Gemischfüllstand. Die hohe Güte der gewünschten Rekonstruktion der Füllstände demonstriert die Leistungsfähigkeit der entwickelten fortgeschrittenen modellgestützten Meßverfahren.
4. Das dargestellte Prinzip ist auch auf andere Problemstellungen übertragbar, bei denen ein Übergang zwischen verschiedenen Signalverläufen herzustellen ist.
5. Damit ist die Funktionsfähigkeit der kontinuierlichen Prozeßbeobachtung nichtlinearer, thermodynamischer Prozesse in einem Druckbehälter mit siedendem Wasser-Dampf Gemisch bei negativen Drucktransienten anhand des Füllstandes nachgewiesen.

7 Zusammenfassung und Wertung

In der Arbeit wurden neue Verfahren für die Modellierung nichtlinearer, thermodynamischer Prozesse in einem Druckbehälter mit siedendem Wasser-Dampf Gemisch bei negativen Drucktransienten (Leck im Dampfraum) entwickelt. Das Verfahren besteht in einem Konzept der kontinuierlichen Prozeßbeobachtung anhand von Füllstandssignalen mittels Anwendung fortgeschrittener modellgestützter Meßverfahren unter Einbeziehung der Fuzzy-Set Theorie. Die Intention ist die Bereitstellung von nichtmeßbaren, sicherheitsrelevanten Zustandsgrößen des Prozesses am Beispiel des Gemischfüllstandes. Die Kenntnis des Massenfüllstandes (Nahbereich) ist zum einen erforderlich als Basisberechnungsgröße für den Gemischfüllstand sowie bei fehlerbehafteten Anzeigen und Meßsystemausfällen.

Die Grundidee der Anwendung von fuzzy-basierten Algorithmen und einem Fuzzy-Modell mit externer Dynamik hat sich in Bezug auf die Nutzung des vorhandenen Erfahrungswissens, die Berücksichtigung der Nichtlinearitäten und der Dynamik, der Abbildung des globalen Übertragungsverhalten durch Kennfelder und der relativ schnellen Bereitstellung zufriedenstellender Lösungen als vorteilhaft erwiesen. Die Leistungsfähigkeit der entwickelten Algorithmen wurde mittels Simulationsergebnissen demonstriert.

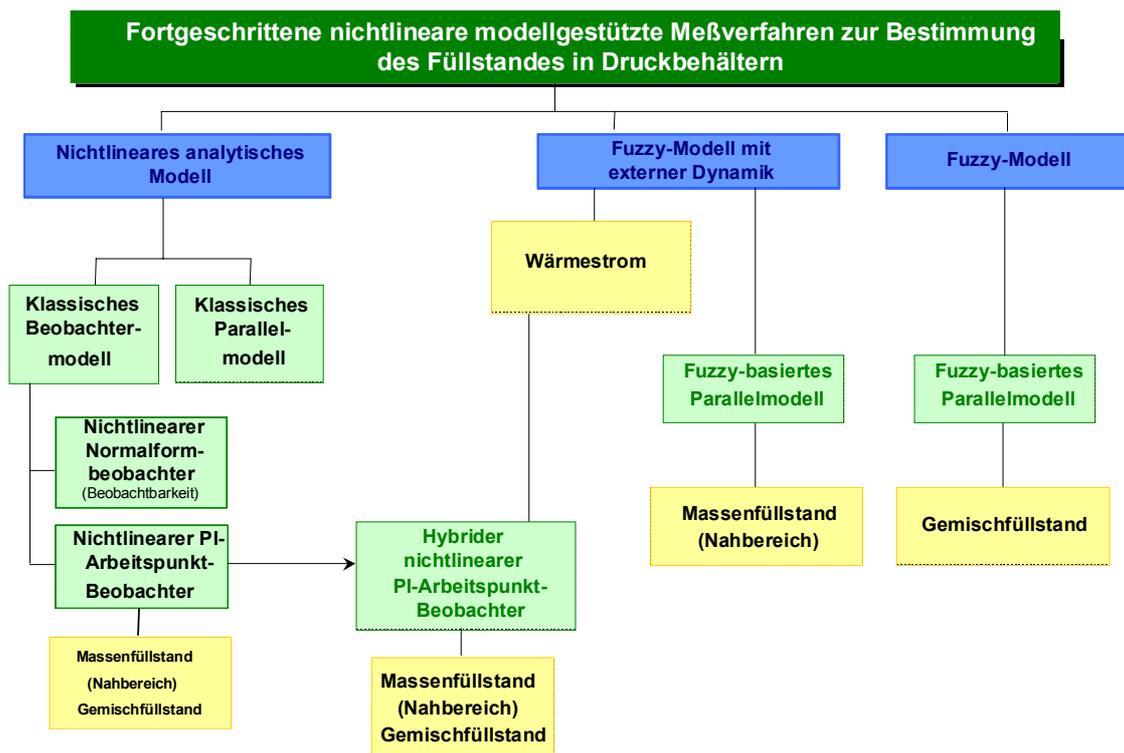


Bild 7-1: Modellgestützte Meßverfahren zur Bestimmung des Massenfüllstandes (Nahbereich) und des Gemischfüllstandes in Druckbehältern mit siedendem Wasser-Dampf Gemisch während negativer Drucktransienten für die kontinuierliche Prozeßbeobachtung

Die entwickelten Komponenten zur Modellierung des Füllstandes im Druckbehälter für die kontinuierliche Prozeßbeobachtung sind in Bild 7-1 zusammengefaßt dargestellt. Der Modellbaum gibt eine Übersicht über die in der Arbeit generierten und verifizierten Modelle und Algorithmen der fortgeschrittenen modellgestützten Meßverfahren.

Die Arbeit beinhaltet folgende Schwerpunkte:

⇒ Kapitel 2

- Beschreibung der Grundlagen nichtlinearer modellgestützter Meßverfahren und Verfahren des Soft Computing, insbesondere der Methodik der Fuzzy-Modellbildung,
- Beschreibung hybrider Modellierung unter Anwendung eines entwickelten Fuzzy-Modells mit externer Dynamik, für das die Anwendbarkeit auf nichtlineare dynamische Prozesse gezeigt wurde,

⇒ Kapitel 3

- Charakteristik der Spezifik und Unschärfen des Prozeßbeispiels besonders hinsichtlich der Füllstandsdynamik und des Wärmestromes sowie Entwicklung der nichtlinearen Modellgleichungen als Parallelmodell (nodales Gemischraummodell),

⇒ Kapitel 4

- Nachweis der Beobachtbarkeit des nichtlinearen Parallelmodells mittels eines nichtlinearen Normalformbeobachters,
- Aufbau eines klassischen nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachters,
- Entwicklung und Parametrierung des neuen fuzzy-basierten Modells zur Beschreibung des physikalischen Parameters Wärmestrom unter Verwendung des Fuzzy-Modells mit externer Dynamik,
- Anwendung des neuen Hybridverfahrens in Form eines neuen hybriden nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachters zur Bestimmung des meßbaren und nichtmeßbaren Massenfüllstandes im Nahbereich für das nodale Gemischraummodell und darauf aufbauend für die Gemischfüllstandsbestimmung,

⇒ Kapitel 5

- Entwicklung und Parametrierung eines neuen fuzzy-basierten modellgestützten Meßverfahrens ohne Rückkopplung (Parallelmodell) für die Bestimmung des Massenfüllstandes (Nahbereich) und des Gemischfüllstandes während negativer Drucktransienten,

⇒ Kapitel 6

- Kombination der fortgeschrittenen modellgestützten Meßverfahren mittels fuzzy-basierter Modellumschaltung zu einem Konzept der kontinuierlichen Prozeßbeobachtung am Beispiel des Füllstandes bei negativen Drucktransienten und Normalbetrieb (stationärer Zustand).

Bei der Generierung und der Parametrierung der Fuzzy-Modelle wurde besonders die Erzielung einer hohen Transparenz der Struktur auf der Basis von Meßgrößen und daraus abgeleiteter Prozeßsignale berücksichtigt.

Die Verifikation der neuen Verfahren und Methoden und deren off-line Test wurde mittels einer umfangreichen Datenbasis durchgeführt, die mittels Experimenten an der Druckbehälterversuchsanlage (DHM) sowie Simulationen mit dem ATHLET-Code generiert wurde (Anhang A 1). Die Nutzung der Datenbasis erfolgte für:

- die Bereitstellung meßbarer und nichtmeßbarer Zustandsgrößen für die Verifikation der entwickelten Modelle und Algorithmen,
- die Analyse dominierender Einflußgrößen,
- die Generierung und Parametrierung der fuzzy-basierten Algorithmen,
- die Bewertung der Güte der Modelle.

Die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit sind:

1. Neues Konzept zur kontinuierlichen Prozeßbeobachtung während der betriebs- und störfallbedingten Übergangsvorgänge und Transienten mittels fuzzy-basierter Modellumschaltung, welches sowohl auf meßbaren als auch auf modellierten und berechneten Füllstandssignalen basiert.
2. Erfolgreicher Nachweis der Eignung des entwickelten Fuzzy-Modells mit externer Dynamik zur Modellierung des vorliegenden nichtlinearen, thermodynamischen Prozesses.
3. Erfolgreiche Anwendung des Fuzzy-Modells mit externer Dynamik zur Modellierung des die Rekonstruktionsgüte beeinflussenden nichtmeßbaren Wärmestroms Wand \Rightarrow Wasser-Dampf Gemisch und des Massenfüllstandes (Nahbereich).
4. Neuer hybrider nichtlinearer PI-Arbeitspunkt-Beobachter für die Modellierung des Massenfüllstandes (Nahbereich) und darauf aufbauend die Gemischfüllstandsbestimmung während negativer Drucktransienten:
 - \Rightarrow Implementierung der Erfahrungen mit klassischen Beobachtermodellen unter Beibehaltung einfacher übersichtlicher, nichtlinearer Beobachterkonzepte,
 - \Rightarrow Bereitstellung eines robusten Modells durch Nutzung einfacher nichtlinearer Modelle und Beobachterverfahren unter Einsatz fuzzy-basierter Methoden,
 - \Rightarrow Signifikante Verbesserung der Rekonstruktionsgüte für den gesamten Parameterbereich der Anlage und über den gesamten Beobachtungszeitraum,
 - \Rightarrow Zuverlässige Bereitstellung der rekonstruierten Zustandsgröße durch das Beobachterkonzept bei Vorhandensein der Meßgröße, der Gemischfüllstand befindet sich innerhalb des Meßbereiches der Nahbereichsmessung.

5. Neue fuzzy-basierte Parallelmodelle auf der Basis von Verhältnisfaktoren für den Gemischfüllstand mit einem klassischen Fuzzy-Modell und für den Massenfüllstand (Nahbereich) mit einem Fuzzy-Modell mit externer Dynamik.
 - ⇒ Zuverlässige und robuste Bereitstellung der rekonstruierten Zustandsgrößen während negativer Drucktransienten:
 - für Meßbereichsüberschreitungen (der Füllstand befindet sich oberhalb der oberen Einbindung des Nahbereichsmeßsystems),
 - für Meßbereichsunterschreitungen (der Füllstand befindet sich unterhalb der unteren Einbindung der Nahbereichsmessung),
 - bei Ausfall des Nahbereichsmeßsystems.
6. Bereitstellung eines kontinuierlichen, zuverlässigen Füllstandssignals mittels der fuzzy-basierten Modellumschaltung für die Umsetzung des neuen Konzeptes zur Prozeßbeobachtung.
7. Spezielle Simulationsprogramme (Module) mit DynStar auf der Grundlage von Funktionsbausteinen sowie der integrierten Fuzzy-Shell zur Realisierung der neuen Verfahren [Fens97-1, 97-3, 98, Hamp99-1]:
 - ⇒ Fuzzy-Module: Wärmestrom, Gemischfüllstand und Massenfüllstand (Nahbereich) (Anhang A 3),
 - ⇒ Modul zur Simulation des nichtlinearen Füllstandsmodells und nichtlinearen hybriden PI-Arbeitspunkt-Beobachters (Anhang A 3),
 - ⇒ Modul zur Detektion signifikanter Prozeßsignale aus Meßgrößen (Anhang A 1),
 - ⇒ Modul zur Umschaltung der Modelle für die kontinuierliche Prozeßbeobachtung (Anhang A 3).

Die Neuigkeit des Verfahrens zur Bestimmung des Füllstandes in Druckbehältern bei negativen Drucktransienten ist begründet in der Anwendung einer Kombination fortgeschrittener modellgestützter Meßverfahren aus hybridem nichtlinearem PI-Arbeitspunktbeobachter und fuzzy-basiertem Parallelmodell als analytische Redundanz unter Einbeziehung der Verfahren des Soft Computing mittels eines Fuzzy-Modells mit externer Dynamik.

Die Arbeit leistet einen Beitrag zur:

- ⇒ Modellierung nichtlinearer Prozesse mit nichtlinearen Methoden,
- ⇒ Verwendung von fuzzy-basierten Algorithmen, speziell des Fuzzy-Modells mit externer Dynamik in Beobachterstrukturen,
- ⇒ Entwicklung einer neuen Qualität fortgeschrittener modellgestützter Meßverfahren in Form von Hybridverfahren und fuzzy-basierten Parallelmodellen zur Ermöglichung und signifikanten Verbesserung der kontinuierlichen Prozeßbeobachtung,
- ⇒ Formulierung eines generellen Konzeptes durch die Entwicklung des Hybridverfahrens und der Prozeßbeobachtung mit der Möglichkeit der Anwendung auf andere Prozesse.

Die genannten Ergebnisse bestätigen das Potential, das durch die Kombination der analytischen Verfahren mit den fuzzy-basierten Verfahren entsteht. Die nächste Stufe der Entwicklung der neuen Verfahren bildet deren on-line Test an einer Druckbehälterversuchsanlage, die einen Teil einer realen Anlage darstellt. Die entwickelten Modelle sind in Echtzeit umzusetzen und dem Prozeßbediener in einfacher Form zur Verfügung zu stellen. Mit dieser Arbeit wird die Voraussetzung dafür mit einfachen, robusten Modellen und Methoden für den Einsatz in der Praxis geschaffen.

Literaturverzeichnis

- [Acke83] **Ackermann, J.:** Abtastregelung.2. Aufl.Bd.1-2. Springer: Berlin.1983
- [Acke88] **Ackermann, G.; et. al.:** Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Dynamik des Druckhalters in Kernkraftwerken mit WWER-Reaktoren. Kernenergie 31(1988), Nr. 3, S.121-125
- [Adja94] **Adjallah, K.:** Non-linear Observers using Fuzzy Gain Adaptation, International Workshop on Fuzzy Technologies in Automation and Control, Duisburg, 1994, S.73-85
- [Alva99] **Alvarez, J.;** Lopez, T.: Robust Dynamic State Estimation of Nonlinear Plants. AIChE Journal 45(1999)1, pp. 107 -123
- [Babu98] **Babuška, R.:** Fuzzy Modelling for Control. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, 1998
- [Band93] **Bandemer, H.;** **Gottwald, S.:** Einführung in Fuzzy-Methoden: Theorie und Anwendungen unscharfer Mengen. 4. Aufl., Akademie Verlag, Berlin, 1993
- [Basu94] **Basu, A.;** **Bartlett, E.:** Detecting Faults in a Nuclear Power Plant by Using Dynamic Node Architecture Artificial Neural Networks. Nuclear Science and Engineering 116(1994), S.313-325
- [Bär87] **Bär, M.;** **Fritz, H.;** **Zeitz, M.:** Rechnergestützter Entwurf nichtlinearer Beobachter mit Hilfe einer symbolverarbeitenden Programmiersprache. Automatisierungstechnik 35(1987), S.178
- [Best83] **Bestle, D.;** **Zeitz, M.:** Canonical form observer design for non-linear time-variable systems. International Journal of Control 38(1983), S.419-431
- [Berg96] **Berger, M.;** **Jelali, M.:** Robust Model-Based Fuzzy Observer for an Inverted Pendulum. IEEE Transactions 1996, S.118-122
- [Bert94] **Bertram, T.;** **et. al.:** Fuzzy Control. Zusammenstellung und Beschreibung wichtiger Begriffe. at – Automatisierungstechnik. 42(1994)7, S.322-326
- [Bezd94] **Bezdek, J. C.:** What is computational intelligence? in: Computational Intelligence: Imitating Life, Zurada, J.M., Marks II, R.J. and Robinson, C.J. (Eds.), IEEE Press, 1-12, 1994.
- [Bien92] **Bien, Z.;****et. al.:** An Automatic Start-up and Shut-down Control of a Drum-type Boiler Using Fuzzy-Logic. Proceedings of the 2nd International Conference on Fuzzy-Logic and Neural Networks, Iizuka, Japan, 1992, S.465-468
- [Birk92] **Birk, J.:** Rechnergestützte Analyse und Lösung nichtlinearer Beobachtungsaufgaben. Fortschritt-Berichte.Reihe 8, Nr.294. VDI: Düsseldorf, 1992
- [Bitz98] **Bitzer, B.;** **Rößler, F.:** A Hybrid Fuzzy Neural Network System for short term electrical load forecasting. EUFIT'98, Aachen, Germany, 7.-10. September 1998

- [Bock94] **Bocklisch, S. F.; Bitterlich, N.:** Fuzzy Pattern Classification - Methodology and Application. In: Kruse, R.; Gebhardt, J.; Palm, R. (Eds): Fuzzy Systems in Computer Science. Vieweg: Braunschweig, Wiesbaden, 1994
- [Bold94] **Boldin, M.:** Ein Beitrag zum Entwurf nichtlinearer Beobachter. Dissertation. TU Berlin, 1994
- [Boll97] **Boll, M.; et. al.:** Fuzzy-Hybrid-Regler für die kontinuierliche Ozonung von Wasser in einem Rohrreaktor. Automatisierungstechnische Praxis 37(1997)1
- [Boss95] **Bossley, K., et. al.:** Neurofuzzy Model Construction for the Modelling of Non-linear Processes. Proceedings of 3rd European Control Conference. Rom, 1995
- [Braz95] **Braza, A.:** Use of Neural Networks for Fault Detection State Estimator Residues Evaluation. Proceedings of 3rd Zittau Fuzzy-Colloquium. 1995
- [Bret95] **Bretthauer, G.; Mikut, R.; Opitz, H.:** Stabilität von Fuzzy-Regelungen - Eine Übersicht. VDI-Berichte, Nr. 1113, S. 287-297, 1995
- [Bret98] **Bretschneider, P.; et. al.:** Hybrid Forecasting Strategy using an Adaptive Fuzzy Classification Algorithm. EUFIT'98, Aachen, Germany, September 7-10, 1998
- [Buch94] **Buchholz, J.:** Sensorfehlererkennung in Flugzeugen mit Beobachter und Polynomklassifikator. Forschungsbericht. Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt. DLR-FB91-34. Köln, 1994
- [Böhm93] **Böhme, J. H.:** Stochastische Signale: eine Einführung in Modelle, Systemtheorie und Statistik. Teubner: Stuttgart, 1993
- [Cao95] **Cao, S. G.; Rees, N. W.:** Identification of dynamic fuzzy models. Fuzzy Sets and systems, 74(1995), S. 307-320
- [Chak96] **Chaker, N.:** Ein Beitrag zur Strukturanalyse und Optimierung von Fuzzy-Controllern am Beispiel einer Turbinenregelung. Dissertation. Technische Hochschule Zittau, 1996
- [Chak98] **Chaker, N.; Wagenknecht, M.; Fenske, A.; Hampel, R.:** Fuzzy Controller Structure Transformation. FLINS'98. Antwerp, Belgium, September 14-16, 1998
- [Chen99] **Chen, J.; et. al.:** Non-linear dynamic systems fault detection and isolation using fuzzy observers. Journal of systems and control Engineering. Vol. 213 Part 1 1999, S. 467-476
- [Clar82] **Clark, R.; Campbell, B.:** Instrument fault detection in a pressurized water reactor pressurizer. Nuclear Technology 56(1982), S. 23-32
- [Dett76] **Dettinger, R.:** Entwurf einer optimalen Regelung für komplizierte Mehrgrößensysteme und Erprobung am Beispiel eines Dampferzeugers. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 8, Nr. 25. VDI: Düsseldorf, 1976

- [Dral98] **Dralus, G.; Fenske, A.; Hampel, R.:** Development of a function block „Neural Network“ within the simulation program system DynStar for description of sensitive state variables in strong non-linear dynamic processes. Technical Report. Hochschule Zittau/Görlitz (FH) IPM, May 1998
- [Drec96] **Drechsel, D.:** Regelbasierte Interpolation und Fuzzy Control. Vieweg Verlag, Braunschweig/ Wiesbaden, 1996
- [Enge95] **Engell, S.:** Entwurf nichtlinearer Regelungen. Beitrag Schaffner, J.; Zeitz, M.: Entwurf nichtlinearer Beobachter. Oldenbourg: München, 1995
- [Enge97] **Engell, S.:** Modellierung und Analyse hybrider dynamischer Systeme. Automatisierungstechnik 45 (1997) 4
- [Fens93] **Fenske, A.:** Beobachter für nichtlineare Systeme. Diplomarbeit, Technische Hochschule Zittau, 1993
- [Fens97-1] **Fenske, A.:** Bestimmung nichtmeßbarer Zustandsgrößen in nichtlinearen Systemen. Zwischenbericht zum Promotionsvorhaben, März 1997
- [Fens97-2] **Fenske, A.; Hampel, R.; Kästner, W.:** Model-based and knowledge-based measuring methods for the observation of non-linear processes. 5th Zittau Fuzzy Colloquium, Zittau, September 4 - 5, 1997
- [Fens97-3] **Fenske, A.; Kästner, W.; Hampel, R.:** Nichtlineare Beobachterstrukturen für die Beschreibung dynamischer Prozesse. Technischer Fachbericht (BMBF-Projekt), Hochschule Zittau/Görlitz (FH), IPM, November 1997
- [Fens98] **Fenske, A.; Kästner, W.; Hampel, R.:** Wissensbasierte Modellierung thermodynamischer und thermohydraulischer Prozesse mittels Fuzzy-Set Theorie am Beispiel der Gemischspiegelbestimmung in Druckbehältern. Technischer Fachbericht (BMBF-Projekt), Hochschule Zittau/Görlitz (FH), IPM, Juni 1998
- [Fisc98] **Fischer, D.; Kohlhepp, P.:** Localization of Objects by a Hybrid System. EUFIT'98, Aachen, Germany, September 7-10, 1998
- [Fisc99] **Fischer, M.; Isermann R.:** Fuzzy Modelle zur Integration theoretischer und experimenteller Modellbildung am Beispiel eines Kreuzstrom-Wärmetauschers. Automatisierungstechnik 47 (1999) 5, S. 224-230
- [Föll89] **Föllinger, O.:** Nichtlineare Regelungen, Bd.I: Grundlagen und Harmonische Balance. Bd.II: Anwendung der Zustandsebene; Ljapunow-Theorie; Popow- und Kreiskriterium. 5. Auflage. R. Oldenbourg: München, 1989
- [Föll94] **Föllinger, O.:** Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendung. Unter Mitw. von Frank Dörrscheidt. 8. überarb. Aufl., Hüthig : Heidelberg, 1994
- [Fran94] **Frank, P.-M.; Seliger, R.:** Anwendung analytischer Redundanz zur Fehlerfrüherkennung in Kernkraftwerken. Abschlußbericht BMFT-Projekt 150 0715 A7, 1994

- [Fran96] **Frank, P.-M.:** Fuzzy-Supervision-Einsatz der Fuzzy-Logik in der Prozeßüberwachung. Proceedings 11.Chemnitzer Kolloquium. Diagnostizieren mit Fuzzy-Methoden, Mai 1996
- [Freu87-1] **Freund, E.:** Regelungssysteme im Zustandsraum, Bd.I: Struktur und Analyse. München,Wien:R.Oldenbourg,1987
- [Freu87-2] **Freund,E.:** Regelungssysteme im Zustandsraum, Bd.II: Synthese. München, Wien: R.Oldenbourg,1987
- [Gest01] **Gesthuisen, R.:** Prozeßvisualisierung von Ploymerisationsprozessen mittels nichtlinearer Zustandsschätzung. Shaker: Aachen, 2001
- [Gill87] **Gilles, E. D.:** Modellgestützte Prozeßleittechnik in der verfahrenstechnischen Produktion. Chem.-Ing.-Tech. 59(1987), S.715-726
- [Goem72] **Goemans,T.:** Mathematical Modeling of Pressurizer Thermodynamics. Dissertation. Universität Delft,1972
- [Göld68] **Göldner, K.:** Mathematische Grundlagen für Regelungstechniker. Fachbuchverlag: Leipzig, 1968
- [Göld82] **Göldner, K.:** Mathematische Grundlagen der Systemanalyse. 2Bde. Fachbuchverlag: Leipzig, 1981/82
- [Hah94] **Hah, Y.; Lee, B.:** Fuzzy Power Control Algorithm for a Pressurized Water Reactor. Nuclear Technology. Vol.106, 1994, Nr.5, S.242-253
- [Hamp94-1] **Hampel, R.; Keil, A.;Gierth, L.:** Fuzzy-Drehzahlregelung. Automatisierungstechnische Praxis 36(1994) ,Nr.3, S.37-42
- [Hamp94-2] **Hampel, R.; Worlitz, F.:** Einsatz von Fuzzy-Logik zur Prozeßdiagnose am Beispiel der hydrostatischen Füllstandsmessung. Technisches Messen 61(1994), S.483-487
- [Hamp94-3] **Hampel, R., et. al.:** Grundlagenuntersuchungen zum Prozeß- und Systemverhalten von Kernkraftwerken. Meß- und Automatisierungstechnik zur Störfallbeherrschung. Abschlußbericht zum BMFT-Projekt 150 0855/7, 1994
- [Hamp94-4] **Hampel, R.; Worlitz, F.; Vandreier, B.; Gocht, U.:** Bestimmung des Gemischspiegels in Druckbehältern. Atomwirtschaft 12/1994
- [Hamp95-1] **Hampel, R., Kästner, W.:** Application of Fuzzy-Logic in Connection with Model-Based Measurement Methods. Proceedings of 3rd Zittau Fuzzy-Colloquium, 1995
- [Hamp95-2] **Hampel, R.; Kästner, W.:** Model-based measurement methods for the determination of the mixture level. 2nd Workshop on Electronic & Measuring systems, Liberec, 1995
- [Hamp96] **Hampel, R.; Kästner, W.:** Developments in Fuzzy-Logic Modelling and Control with Application to Industrial Systems. Proceedings of Fuzzy96 Colloquium, Zittau, September 1996

- [Hamp97] **Hampel, R.; Chaker, N.:** Application of Fuzzy Logic in Control and Limitation Systems using Industrial Hardware. 3rd International Mendel Conference, Brno, Czech Republic, June 1997
- [Hamp98] **Hampel, R.; Kästner, W.; Fenske, A.; Schefter, S.:** Anwendung modellgestützter Meßverfahren für die Bestimmung von Prozesszuständen und Prozessparametern in Druckbehältern mit Zweiphasengemisch. Meßtechnik für stationäre und transiente Mehrphasenströmung. 2. Workshop. Rossendorf, September 1998
- [Hamp99-1] **Hampel, R.; Kästner, W.; Fenske, A.; Vandreier, B.; Schefter, S.:** Meß- und Automatisierungstechnik zur Störfallbeherrschung - Methoden der Signalverarbeitung, Simulation und Verifikation. Abschlußbericht zum BMBF-Projekt 150 10 15, Hochschule Zittau/Görlitz (FH), Januar 1999
- [Hamp99-2] **Hampel, R.; Kästner, W.; Fenske, A.; Vandreier, B.; Schefter, S.:** Analysis of Selected Structures for Model-Based Measuring Methods using Fuzzy Logic. in Da Ruan (Editor), Fuzzy Systems and Soft Computing in Nuclear Engineering, Physica Verlag, pp.1-38
- [Hamp00] **Hampel, R.; Kästner, W.; Fenske, A.; Vandreier, B.:** Improvement of the Robustness of Model-Based Measuring Methods Using Fuzzy Logic. Int. J. General Systems, Vol. 29(2), pp.281-303, OPA, 2000
- [Hase96] **Hase, M.:** Untersuchung des Einflusses der virtuellen linguistischen Variablen auf das Verhalten von Fuzzy-Controllern. Diplomarbeit. TH Zittau, 1996
- [Hell96] **Hellendoorn, H.; Reinfrank, M.; Driankov, D.:** An Introduction to Fuzzy-Control. Springer: Berlin, 1996
- [Heis95] **Heiss, M.:** Kennfelder in der Regelungstechnik. Automatisierungstechnik 43(1995)8
- [Hens95] **Hensel, H.; et. al.:** Optimierung von Fuzzy-Control mit Hilfe neuronaler Netze. Automatisierungstechnische Praxis 37(1995), S.40-48
- [Hess96] **Hessel, G.; et. al.:** Leckagen überwachen. Technische Überwachung 37(1996) Nr.4, S.17-21
- [Hoff93] **Hoffmann, N.:** Kleines Handbuch neuronale Netze: Anwendungsorientiertes Wissen zum Lernen und Nachschlagen. Vieweg: Braunschweig, 1993
- [Hush93] **Hush, D.; Horne, B.:** Progress in Supervised Neural Networks. IEEE Signal Processing Magazine, 1993, S. 8-39
- [Iser87] **Isermann, R.:** Digitale Regelsysteme. Springer: Berlin, 1987
- [Iser88] **Isermann, R.:** Identifikation dynamischer Systeme. Springer: Berlin, 1988
- [Jela97] **Jelali, M.:** Über die nichtlineare Approximation und Zustandsschätzung zeitkontinuierlicher dynamischer Prozesse. Fortschritt-Berichte Reihe 8, Nr. 636, VDI: Düsseldorf, 1997

- [Jörn97]** **Jörns, C.; Kühner, R.:** Hybride Modellierung des innerstädtischen Verkehrs auf der Basis adaptiver interpretierter Petri-Netze. *Automatisierungstechnik* 45(1997)1
- [Jung88]** **Junghans; Döring; Stoll:** Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Druckhalterdynamik. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 115/41b (KKW Nord), Ingenieurhochschule Zittau, Nr.1664/88
- [Käst96]** **Kästner, W.:** Anwendung modellgestützter Meßverfahren zur Bestimmung des Gemischspiegels in Druckbehältern. Dissertation. Technische Hochschule Zittau, 1996
- [Käst98-1]** **Kästner, W.; Fenske, A.; Hampel, R.:** Improvement of the Robustness of Model-based Measuring Methods using Fuzzy Logic. FLINS'98 (Fuzzy Logic and Intelligent Technologies for Nuclear Science and Industry). Antwerp, Belgium, September 14 - 16, 1998
- [Käst98-2]** **Kästner, W.; Fenske, A.; Vandreier, B.; Hampel, R.:** Fuzzy-based Adaptation of the Observer Gain - a Compromise between Convergence and Filtering, 6th Zittau Fuzzy Colloquium, Zittau, September 3 - 4, 1998
- [Käst00-1]** **Kästner, W.; Traichel, A.; Vandreier, B.; Hampel, R.:** Intelligent methods of signal processing in nuclear science – a necessity now and in future. Jahrestagung Kerntechnik, Bonn, Mai 2000
- [Käst00-2]** **Kästner, W.; Traichel, A.; Hampel, R.:** Application of Fuzzy Logic for the Modeling of Non-linear Processes n Nuclear Technology Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technologies. NPIC & HMIT 2000 Washington D.C., November 2000
- [Kell86-1]** **Keller, H.:** Entwurf nichtlinearer Beobachter mittels Normalformen. Fortschritt-Bericht der VDI-Zeitschriften. Reihe 8, Nr.124. VDI: Düsseldorf, 1986
- [Kell86-2]** **Keller, H.:** Entwurf nichtlinearer, zeitvarianter Beobachter durch Polvorgabe mit Hilfe einer Zweischrittransformation. *Automatisierungstechnik* 34(1986), Teil I S.271, Teil II S.326
- [Kien93]** **Kiendl, H.; et. al.:** Fuzzy Control. Theorie für den Anwender. at – Automatisierungstechnik, 41 (1993) 1-12, A1-A40
- [Kien97]** **Kiendl, H.:** Fuzzy Control methodenorientiert. Oldenbourg, München, 1997
- [Kosk92]** **Kosko, B.:** Neural Networks and Fuzzy-Systems. Prentice Hall: New York, 1992
- [Kou73]** **Kou, S. R.; et. al.:** Observability of nonlinear systems. *Information and Control* 22(1973), S.89-99
- [Kou75]** **Kou, S. R.; et. al.:** Exponential Observers for Nonlinear Dynamic Systems. *Information and control* 29(1975), S.204-216

- [Kren83] **Krener, A. J.; Isidori, A.:** Linearization by output injection and nonlinear observers. *System & Control Letters* 3(1983), S.47-52
- [Kren85] **Krener, A. J.; Respondek, W.:** Nonlinear observer with linearizable error dynamics. *SIAM Journal on Control and Optimization* 23(1985), S.197-216
- [Krol97] **Kroll, A.:** Fuzzy-Systeme zur Modellierung und Regelung komplexer technischer Systeme. *Fortschrittberichte Reihe 8, Nr.612*, VDI: Düsseldorf, 1997
- [Krol00] **Kroll, A.; Bernd, T.:** Nichtlineare modellprädiktive Regelung mit Fuzzy-Prädiktionsmodell für einen hydraulischen Antrieb. *VDI-Berichte 1526 (GMA). Computational Intelligence im industriellen Einsatz*, 2000, S.329-335
- [Kubi83] **Kubik, S.; Göldner, K.:** Nichtlineare Systeme der Regelungstechnik. 2.Auflage. *Technik: Berlin*, 1983
- [Küpp96] **Küpper, K.:** Zur Modellierung technischer Systeme mittels Fuzzy-Logik. *Fortschrittberichte Reihe 8, Nr.507*, Düsseldorf:VDI, 1996
- [Leic95] **Leichtfried, J.; Heiss, M.:** Ein kennfeldorientiertes Konzept für Fuzzy-Regler. *Automatisierungstechnik* 43(1995)1
- [Leiv98] **Leiviskä, K.:** Industrial Applications of Intelligent Methods. *EUFIT'98*, Aachen, Germany, September 7-10, 1998
- [Lenz98] **Lenz, U.:** Lernfähige neuronale Beobachter für eine Klasse nichtlinearer dynamischer Systeme und ihre Anwendung zur intelligenten Regelung von Verbrennungsmotoren. *Utz. München*, 1998
- [Leve91] **Levent, H.; Altin, V.:** Rule-Based Fuzzy-Logic Modell for a PWR-Type Nuclear Power Plant. *IEEE Transactions On Nuclear Science*, Vol. 38 (1991) Nr.2, S.883-890
- [Marg67] **Margenau, H.; Murphy, G.:** Die Mathematik für Physik und Chemie. Bd.II. Harri Deutsch: Frankfurt/M, 1967 Kapitel 6: Nichtlineare Probleme in Physik und Technik
- [Mart96] **Martinetz, T.; et. al.:** Neuronale Netze zur Steuerung von Walzstraßen. *Automatisierungstechnische Praxis* 38(1996), Nr.10, S.28-42
- [Meis76] **Meissner, R.:** Druckhaltermodell zur Simulation von Betriebsstörungen in Druckwasserreaktoranlagen. *Laboratorium für Reaktoranlagen und Anlagensicherung Garching.MRR-154*, 1976
- [Meli00] **Melin, P.; Castillo, O.:** Adaptive intelligent control of aircraft dynamic systems with a new hybrid neuro-fuzzy-fractal approach. *FLINS 2000*. Bruges, Belgium, August 28-30, 2000
- [Mich95] **Michels, K.:** A model-based fuzzy controller. *Fuzzy Sets and systems*, 85(1995), S. 223-232

- [Miku95] **Mikut, R.; Bretthauer, G.:** Stability problems of fuzzy systems and a concept for an on-line stabilization of control loops. Proceedings of 3rd Zittau Fuzzy Colloquium, September 1995
- [Miku99-1] **Mikut, R.:** Modellgestützte on-line Stabilitätsüberwachung komplexer Systeme auf der Basis unscharfer Ljapunow-Funktionen. Dissertation. Universität Karlsruhe, 1999
- [Miku99-2] **Mikut, R.; Bretthauer, G.:** The evaluation of disturbed control systems by means of fuzzy supervision. Proceedings of EUFIT '99, September 13-16, Aachen, Germany, 1999
- [Naha70] **Nahavandi, A.; Makkenchery, S.:** An improved pressurizer model with bubblerise and condensate drop dynamics. Nuclear Engineering and Design 12(1970), S.135-147
- [Nare90] **Narendra, K. S.; Parthasarathy, K.:** Identification and control of dynamic systems using neural networks. IEEE Trans. Neural Networks, 1990, Vol. 1, pp. 4-27.
- [Nauc94] **Nauck, D.; et. al.:** Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme. Vieweg: Braunschweig, 1994
- [Nell97] **Nelles, O.; et. al.:** Neuronale Netze zur Identifikation nichtlinearer, dynamischer Systeme: Ein Überblick. Automatisierungstechnik 45(1997)7
- [Nikr96] **Nikraves, M.:** Dynamic Neural Network Control of Nonlinear-Time Varying System: Stability Analysis, Optimal Network Structure, and On-Line Adaptation. IEEE Transactions on Neural Networks 1996, S. 128-133
- [Oliv99] **Oliveira, R.; et. al.:** Hybride Methoden zur Optimierung biotechnischer Produktionsprozesse. Automatisierungstechnische Praxis 41 (1999) 3, S.12-24
- [Opit93] **Opitz, H. P.:** Fuzzy Control. Teil 6: Stabilität von Fuzzy-Regelungen. at – Automatisierungstechnik. 41(1993), A21-A24
- [Otto95] **Otto, P.:** Identifikation nichtlinearer Systeme mit Künstlichen Neuronalen Netzen. at - Automatisierungstechnik 43(1995)2
- [Panr99] **Panreck, K.:** Systembeschreibung zur Modellierung komplexer Systeme. Automatisierungstechnik 47 (1999) 4, S.157-164
- [Popp92] **Popp, H. E.:** Hybride wissensbasierte Systeme zur Datenanalyse und Eigenschaftsvorausberechnung physikalisch-chemischer Systeme dargestellt an Elektrolytlösungen. Dissertation. Universität Regensburg, 1992
- [Pras81] **Prasser, M.:** Ein mathematisches Modell zur Zweiphasenströmung in einem zylindrischen Druckgefäß bei kleinen Lecks. Kernenergie 25(1981), S.294-298
- [Pras95] **Prasser, M.:** Aufwallen und Austragen von zweiphasigen Gemischen. DECHEMA-Jahrestagung. Poster 95. Wiesbaden, 1995

- [Pras96]** Prasser, M.: BLDN-Programm zur Berechnung der axialen Dampfgehaltsverteilung und der Höhenstandsverläufe in Druckgefäßen bei negativen Drucktransienten. Beschreibung, Rossendorf, 1996
- [Preu95]** Preuß, H.; Ockel, J.: Lernverfahren für Fuzzy-Regler. Automatisierungstechnische Praxis 37(1995), S.10-20
- [Proc89]** Prock, J.: Ein prozeßunabhängiges Konzept zur Meßfehlererkennung mit Hilfe analytischer Redundanzmethoden. Abschlußbericht. GRS-A-1620, 1989
- [Rais95]** Raisch, J.: Analyse und Synthese einfacher hybrider Regelsysteme. at - Automatisierungstechnik 43(1995)5
- [Ritt91]** Ritter, H.; et. al.: Neuronale Netze. 2.Aufl. Addison-Wesley: München, 1991
- [Schä97]** Schäffner, C.; Schröder, D.: Entwurf lernfähiger nichtlinearer Beobachter mit neuronalen Netzen. Automatisierungstechnik 45(1997)7
- [Schä99]** Schäfers, E.: Dynamische Fuzzy-Systeme zur qualitativen Prozeßmodellierung: Eine neue Systemtheorie. VDI-Fortschrittberichte, Reihe 8, Nr. 745, 1999
- [Sche98-1]** Schefter, S.: Entwicklung eines Moduls „Fuzzy Modell“ zur Implementierung in den Simulationscode ATHLET. Diplomarbeit, HTWS Zittau/Görlitz (FH), Februar 1998
- [Sche98-2]** Schefter, S.: Analyse des Einflusses von Fuzzy-Kenngrößen auf die Kennfeldcharakteristik des Fuzzyunterstützten Beobachters und Erweiterung des Gültigkeitsbereiches des Fuzzyunterstützten Beobachters durch eine arbeitspunktabhängige Umschaltung von Fuzzy Controllern. Technischer Fachbericht BMBF-Projekt 150 10 15, Juni 1998
- [Schm99]** Schmid, K.; Krebs, V.: Qualitative Modeling and Model Design using Dynamic Fuzzy Systems. Proceedings of EUFIT '99, September 13-16, Aachen, Germany, 1999
- [Schr00]** Schröder, D. (ed.): Intelligent observer and control design for nonlinear systems. Springer: Berlin, 2000
- [Seid81]** Seidel, H.: Nichtlineare Beobachter zur Schätzung von Zustandsgrößen der Längsbewegung eines Flugzeuges. Dissertation. TU Braunschweig, 1981
- [Sera94]** Seraphin, M.: Neuronale Netze und Fuzzy-Logik. Franzis: München, 1994
- [Simu92]** Simutis, R.; Havlik, I.; Lübbert, A.: A fuzzy-supported Extended Kalman Filter: a new approach to state estimation and prediction exemplified by alcohol formation in beer brewing, Journal of Biotechnology, 24 (1992), S.211-234
- [Solo74]** Solodownikow, W. W.: Instationäre und nichtlineare Systeme. Technik: Berlin, 1974

- [Ste96] **Steinkogler, A; Koch, J.:** Genetic programming designs hierarchic fuzzy logic controllers. Proceedings International Fuzzy Conference Fuzzy'96, Zittau, Germany, 1996
- [Stem00] **Stemberk, P.:** Fuzzy Heat Transfer. Fast Computing Formulation. Proceedings of EAST WEST Fuzzy Colloquium, September 6-8, Zittau, Germany, 2000
- [Stie95] **Stieler, H.:** Analyse der Möglichkeiten zur Kombination verschiedener Verfahren der analytischen Redundanz. Diplomarbeit, TH Zittau, 1995
- [Stro75] **Strobel, H.:** Experimentelle Systemanalyse. Berlin, Akademie Verlag, 1975
- [Thau73] **Thau, F. E.:** Observing the state of non-linear dynamic systems. International Journal on Control 17(1973), S.471-479
- [Trae93] **Traeger, D.:** Einführung in die Fuzzy-Logik. Teubner: Stuttgart, 1993
- [Trai99] **Traichel, A.; Kästner, W.; Hampel, R.:** Fuzzy Modeling of Dynamic Non-Linear Processes - Applied for Water Level Measurement. 7th Zittau Fuzzy Colloquium, September 8-10, 1999, Proceedings, pp.119-134. *auch in:* Fuzzy Control - Theory and Practice Editors: R. Hampel, M. Wagenknecht, N. Chaker, IPM, Series: Advances in Soft Computing, Physica-Verlag, 2000
- [Trai00] **Traichel, A.; Kästner, W.; Hampel, R.:** Fuzzy-adaptierte Modellgestützte Messverfahren. 10. Workshop des GMA-FA 5.22 Fuzzy Control, Dortmund, 19-20.10.2000
- [Titl97] **Marin, P.; Titli; A.:** Fuzzy stability analysis of fuzzy systems. part I: Quadratic parametrization of fuzzy systems. part II: Fuzzification of Lyapunov theory and application. EUFIT 1997, Band 2, S. 1294-1305.
- [Tudo98] **Tudorie, C.; et. al.:** The Decision Problem in a Hybrid (Neuro-Symbolic) Diagnosis. EUFIT'98, Aachen, Germany, September 7-10, 1998
- [Tyle82] **Tylee, J. L.:** A generalized likelihood ratio approach to detecting and identifying failures in pressurizer instrumentation. Nuclear technology 56(1982), S.484-492
- [Unbe94] **Unbehauen, H.:** Regelungstechnik. 3 Bd. 4. Aufl., Vieweg: Braunschweig, 1994
- [vAlt93] **von Altrock, C.:** Fuzzy-Logik. Bd.1-3, Oldenbourg: München, 1993
- [Wagn95] **Wagner, M.:** Analyse von Möglichkeiten der Modelladaption mit Hilfe von Verfahren der unscharfen Signalverarbeitung. Diplomarbeit. TH Zittau, 1995
- [Wern89] **Wernstedt, J.:** Experimentelle Prozeßanalyse. Technik: Berlin, 1989
- [Wey99] **Wey, T.; Spielmann, M.:** Analytische und Fuzzy Regelungskonzepte am Beispiel eines aufrechtstehenden Pendels. Automatisierungstechnik 47(1999)1, S.20-28

- [Woll94] **Wollert, J.:** Ein Beitrag zur kognitiven Modellierung regelungstechnischer Systeme unter Berücksichtigung heuristischer und analytischer Merkmale. Fortschritt-Berichte Reihe 8, Nr.450, VDI: Düsseldorf, 1994
- [Worl93] **Worlitz, F.:** Anwendung klassischer Verfahren und Fuzzy-Logik zur Verbesserung der hydrostatischen Höhenstandsmessung. Dissertation. TH Zittau, 1993
- [Zade65] **Zadeh, L. A.:** Fuzzy Sets. Information and Control. 9(1965), pp.338-353
- [Zade68] **Zadeh, L. A.:** Fuzzy Algorithms. Information and Control. 12(1968), pp.94-102
- [Zade94] **Zadeh, L. A.:** Soft Computing and Fuzzy Logic. IEEE Software. 1994, 11(6), pp.48-56.
- [Zeit77] **Zeitz, M.:** Nichtlineare Beobachter für chemische Reaktoren. Fortschritt-Bericht Reihe 8, Nr.27. VDI: Düsseldorf, 1977
- [Zeit79] **Zeitz, M.:** Nichtlineare Beobachter. Regelungstechnik 27(1979), S.241-272
- [Zeit84] **Zeitz, M.:** Observability canonical (phase-Variable) form for nonlinear time-variable systems. International Journal Systems Sci. 15(1984), S.949-958
- [Zimm91] **Zimmermann, H.-J.:** Fuzzy Set Theory and its Application. Kluver: Boston, 1991
- [Zimm97] **Zimmer, G.:** Zustandsbeobachtung nichtlinearer Systeme. Shaker: Aachen, 1997
- [ATHL97] **ATHLET-Code Mod 1.1 Cycle D User's Manual.** Best-estimate-Code für die Analyse der Thermohydraulik von Lecks und Transienten. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Garching, März 1997
- [DynS00] **DynStar** - ein Simulationsprogramm für dynamische Prozesse, Hochschule Zittau/Görlitz (FH), Institut für Prozesstechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik (IPM), Version 7.27 Fuzzy87+, 2000

A 1 Experimente und Simulationsrechnungen zur Generierung der Datenbasis

A 1.1 Beschreibung der Versuchsanlage Druckbehältermodell (DHM) am Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik (IPM)

Mit der Versuchsanlage Druckbehältermodell (DHM) lassen sich transiente Vorgänge in einem Druckbehälter mit Wasser-Dampf Gemisch im Bereich von $p = 0,1 \dots 2,5 \text{ MPa}$ simulieren. Der Versuchsstand besteht aus folgenden Hauptkomponenten (Bild A1-1):

1. Druckbehälter mit elektrischer Heizung $1 \times 4,0 \text{ kW}$, $1 \times 2,0 \text{ kW}$,
2. Störgefäß mit elektrischer Heizung $1 \times 4,0 \text{ kW}$, $1 \times 2,0 \text{ kW}$,
3. Abblasebehälter,
4. Pumpen (zwei) zum Füllen bzw. zur Druckauflastung,
5. Magnetventile.

Die wichtigsten geometrischen Abmessungen des Druckbehälters sind:

1. Höhe : 4,0 m,
2. Innendurchmesser : 0,088 m,
3. Volumen : 0,0243 m³,
4. Wandstärke : 0,01 m.

Im Abstand von 200 mm axial verteilte Stützen ermöglichen den Einbau zusätzlicher Sensoren. Ein Abblasestutzen im Deckel ermöglicht die Simulation von Lecks im Dampfraum. Über entsprechende Blenden kann die Größe des negativen Druckgradienten variiert werden. Der Versuchsstand ist mit Meßtechnik zur Bestimmung des Massenfüllstandes (Weitbereich und Nahbereich) und des Druckes ausgerüstet. Der Betrieb der Anlage sowie die Erfassung und Verarbeitung der Meßwerte erfolgten rechnergestützt. Die an der Versuchsanlage installierte Meßtechnik kann wie folgt untergliedert werden:

- ⇒ **Betriebsmeßtechnik** (Meßtechnik zum sicheren Betrieb der Anlage; Druck- und Massenfüllstandsmessung für jeden der drei Behälter),
- ⇒ **Experimentelle Meßtechnik** (Meßtechnik zur Identifikation von Einzeleffekten) [Hamp99-1]
 - Füllstandsmeßsysteme unterschiedlicher Konstruktion bzw. mit unterschiedlichen Meßbereichen,
 - Leitfähigkeitssonden (Nadelsonden) zur Grenzflächendetektion Wasser/Dampf,
 - Temperaturmeßstellen zur Bestimmung der axialen Temperaturverteilung im Zweikammerpegelgefäß (ZKPG).

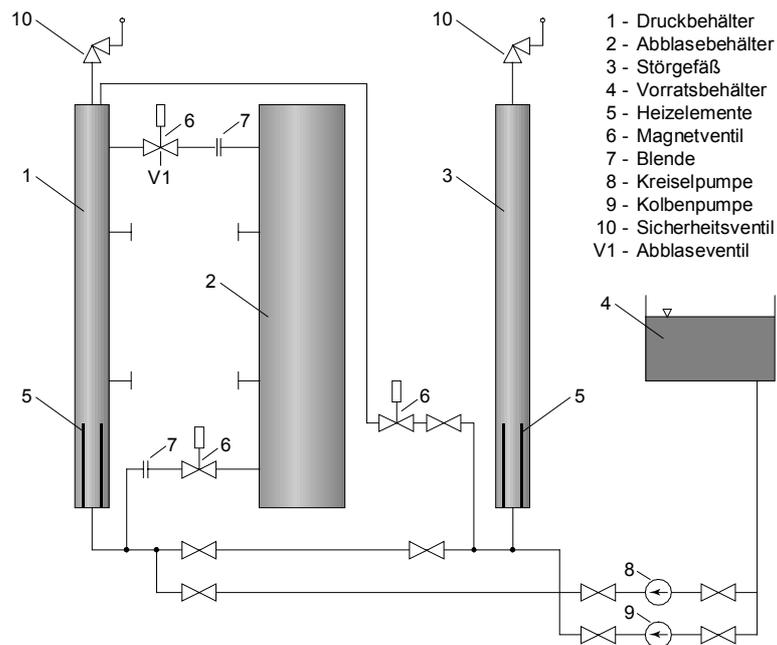


Bild A1-1: Vereinfachtes Schaltbild der Versuchsanlage Druckbehältermodell (DHM)

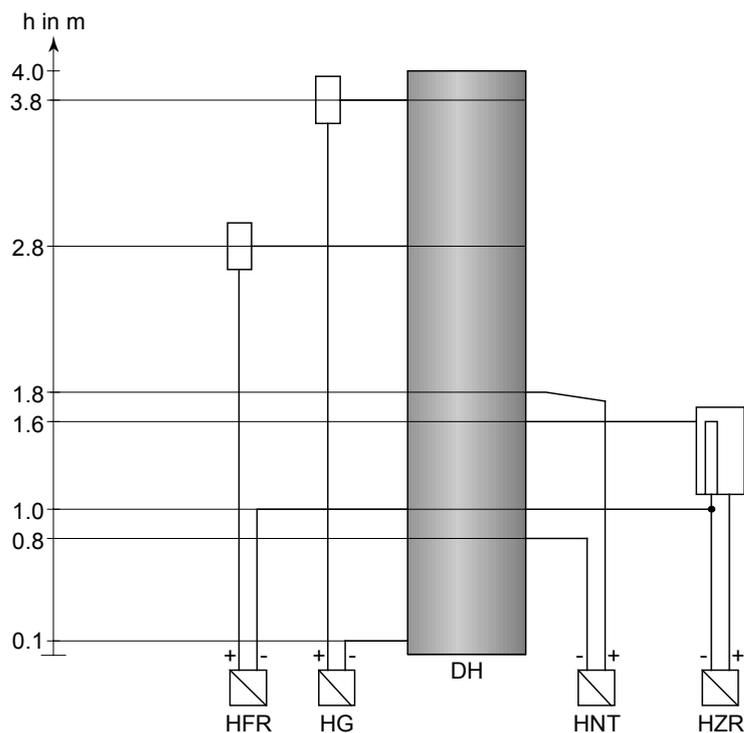


Bild A1-2: Anordnung der hydrostatischen Meßsysteme zur Bestimmung des Füllstandes im Druckbehälter

- HFR - Massenfüllstand (Nahbereich) mit Einkammerpegelgefäß (Typ DME- MI)
- HG - Massenfüllstand (Weitbereich) mit Einkammerpegelgefäß
- HNT - Massenfüllstand (Nahbereich) mit Nullkammerpegelgefäß
- HZR - Massenfüllstand (Nahbereich) mit Zweikammerpegelgefäß (Typ DME- MI)

Experimentelle Anordnung der Füllstandsmeßsysteme

Für die Bestimmung des Füllstandes im Druckbehälter wurden verschiedene konstruktive Auslegungen von hydrostatischen Füllstandsmeßsystemen mit unterschiedlichen Meßbereichen installiert (Bild A1-2):

1. Nullkammerpegelgefäß (NKPG) Meßbereich: 0,8 - 1,8 m (Massenfüllstand (Nahbereich)),
2. Einkammerpegelgefäß (EKPG) Meßbereich: 0,1 - 3,8 m (Massenfüllstand (Weitbereich)),
Meßbereich: 1,0 - 2,8 m (Massenfüllstand (Nahbereich)),
3. Zweikammerpegelgefäß (ZKPG) Meßbereich: 1,0 - 1,6 m (Massenfüllstand (Nahbereich)).

Die untere Einbindung des ZKPG befindet sich auf der Höhe der unteren Einbindung einer Meßstelle mit Einkammerpegelgefäß (EKPG) (Bild A1-2). Damit wirken die gleichen prozeßspezifischen Einflüsse auf beide Meßsysteme und die Meßsignale sind vergleichbar.

Hydrostatisches Meßprinzip

Die hydrostatische Füllstandsmessung wird über die Bestimmung des Differenzdruckes zwischen zwei Flüssigkeitssäulen (Minussäule, Plussäule) realisiert. Die Minussäule repräsentiert den Massenfüllstand im Druckbehälter, während mit Hilfe der Plussäule ein konstanter Bezugsmassenfüllstand geschaffen wird. Die an der Versuchsanlage installierten unterschiedlichen konstruktiven Auslegungen der Einkammer- und Zweikammerpegelgefäße sind im Bild A1-3 veranschaulicht. Der konstante Bezugsmassenfüllstand H in der Vergleichssäule wird durch eine ständige Kondensation über die obere Einbindung ermöglicht.

Der angezeigte Massenfüllstand (hm_a) und damit der Massenfüllstand im Druckbehälter zwischen den Einbindungen des Meßsystems (h) wird über die Beziehung entsprechend Gleichung (A1.1) bestimmt (Bild A1-3) [Hamp99-1]:

$$h = hm_a = \frac{(\rho_I - \rho'') \cdot g \cdot H - \Delta p}{(\rho' - \rho'') \cdot g} \quad (A1.1)$$

- h - Massenfüllstand im Druckbehälter (zwischen den Einbindungen)
- hm_a - angezeigter Massenfüllstand (zwischen den Einbindungen)
- ρ_I - Dichte des Wassers in der Vergleichssäule
- ρ' - Dichte des Wassers bei Siedeparametern
(Wasserphase im Druckbehälter und in der Minussäule)
- ρ'' - Dichte des Dampfes bei Siedeparametern
(Dampfphase im Druckbehälter und im Pegelgefäß)
- g - Erdbeschleunigung
- H - Vergleichsfüllstand
- Δp - Differenzdruck

Eine ausführliche Darstellung des Meßprinzips und der bei den einzelnen konstruktiven Lösungen auftretenden thermohydraulischen und thermodynamischen Effekte ist [Worl93] zu entnehmen.

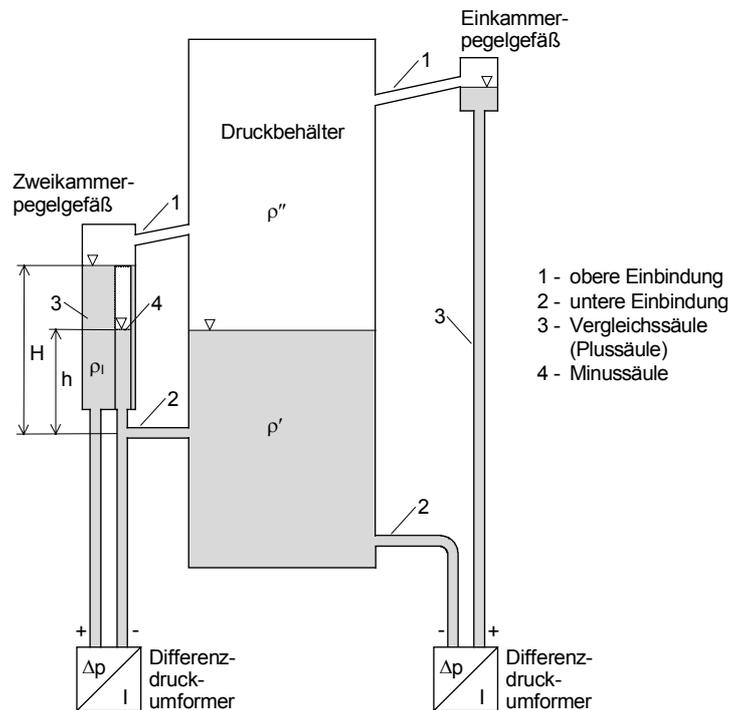


Bild A1-3: Prinzip der hydrostatischen Füllstandsmessung mit Einkammerpegelgefäß und Zweikammerpegelgefäß

A 1.2 Übersicht und Versuchsablauf der durchgeführten Experimente, Datenbasis

Es wurden insgesamt 55 Abblaseexperimente und Simulationen mittels ATHLET-Code in Form von zwei Experimentreihen mit zwei unterschiedlichen Blendendurchmessern durchgeführt, die sich hinsichtlich der Versuchsrandbedingungen unterscheiden. Es erfolgte eine Variation der Anfangsdrücke und Anfangsmassenfüllstände vor Beginn der Druckentlastung. Die Variation der maximalen Druckänderungsgeschwindigkeit wurde mit Hilfe der beiden Blendendurchmesser ($d_{Bl} = 2 \text{ mm}$ und 5 mm) in der Abblaseleitung realisiert.

A 1.2.1 Experimentreihe 1

Die Vorexperimente 1 - 3 wurden vor der Umrüstung der Versuchsanlage durchgeführt. Für die Detektion der Füllstandsaufspreizung waren folgende Meßsysteme für den Massenfüllstand (Nahbereich) mit den verschiedenen Pegelgefäßkonstruktionen installiert:

- ⇒ EKPG (Meßbereich 1,0 m bis 2,8 m),
- ⇒ NKPG (Meßbereich 0,8 m bis 1,8 m),
- ⇒ ZKPG (Meßbereich 1,0 m bis 1,6 m).

Durchgeführt wurde die Variation der Anfangsdrücke zu Experimentbeginn sowie die Variation der maximalen Druckänderungsgeschwindigkeit (Durchmesser der Blende: 5mm (groß), 2 mm (klein)). Der Anfangsmassenfüllstand wurde nur unwesentlich modifiziert. In der Tabelle A1-1 werden in einer Übersicht die wesentlichen Prozeßparameter der für die Generierung der Datenbasis verwendeten Experimente der ersten Experimentreihe zusammengestellt. Die Verifikation der Ergebnisse der ATHLET-Code Nachrechnungen für die Füllstandsaufspreizung während der Transiente erfolgte anhand dieser drei Massenfüllstandsverläufe [Käst96].

Tabelle A1-1: Übersicht zu den Abblaseexperimenten der Experimentreihe 1

Bezeichnung des Experimentes	Durchmesser Blende d_{Bl} in mm	Anfangsdruck p_0 in MPa	Enddruck p_E in MPa	Anfangsmassenfüllstand h_0 in m	Endmassenfüllstand h_E in m	Zeitdauer der Druckentlastung t_{BD} in s
Vorexperiment 1 BD1105V4	5	1,4	0,60	1,14	1,01	60
Vorexperiment 2 BD1705V2	2	1,8	0,90	1,18	1,05	180
Vorexperiment 3 H1706V09	5	2,0	0,6	1,19	0,96	70

Tabelle A1-2: Simulationen mittels ATHLET-Code mit Variation des Anfangsdruckes p_{z0} und des Anfangsmassenfüllstandes h_{z0} zum Prozeßzeitpunkt Zustand 0
 ∇ - Simulationen $d_{Bl} = 5$ mm Δ - Simulationen $d_{Bl} = 2$ mm , Nummer des Experimentes (Exp.)

Simulation	$p_{z0}=1.4$ [MPa]	$p_{z0}=1.6$ [MPa]	$p_{z0}=1.8$ [MPa]	$p_{z0}=2.0$ [MPa]	$p_{z0}=2.2$ [MPa]	$p_{z0}=2.4$ [MPa]
$h_{z0} = 120$ cm	∇ (BD14H120) Exp. 1	∇ (BD16H120) Exp. 3	∇ (BD18H1 20) Exp. 4	∇ (BD20H120) Exp. 6	∇ (BD22H120) Exp. 7	∇ (BD24H120) Exp. 8
	Δ (BD14H120) Exp. 2		Δ (BD18H1 20) Exp. 5			Δ (BD24H120) Exp. 9
$h_{z0} = 140$ cm	∇ (BD14H140) Exp. 10	-	-	-	-	∇ (BD24H140) Exp. 11
$h_{z0} = 160$ cm	∇ (BD14H160) Exp. 12	-	-	-	-	∇ (BD24H160) Exp. 14
	Δ (BD14H160) Exp. 13					Δ (BD24H160) Exp. 15

Die Vorexperimente 2 und 3 bilden die Grundlage für die Datenbasis der Experimentreihe 1. Mit dem ATHLET-Code wurden diese Experimente nachgerechnet und zusätzlich Simulationsrechnungen zur Erweiterung der Datenbasis hinsichtlich der Variation des Anfangsmassenfüllstandes und Anfangsdrucks durchgeführt (Tabelle A1-2). Dabei wurden die Blendendurchmesser entsprechend der beiden Vorexperimente (2 und 5 mm) verwendet sowie die Zeitdauer der Druckentlastung gleich gehalten, so daß sich jeweils unterschiedliche Enddrücke ergeben. Der Anfangsmassenfüllstand wurde für die Simulationen der Experimente auf 1,20 m gesetzt. Die Datensätze dienen dem Nachweis des Gültigkeitsbereiches der Fuzzy-Modelle für den Massenfüllstand (Nahbereich) und den Gemischfüllstand. Die Simulationen werden der Übersichtlichkeit und Vereinfachung halber in der Bezeichnung als Experimente (Exp.) in der Tabelle A1-2 durchnummeriert.

Die Tabelle A1-3 enthält die Daten, die der Erstellung der Fuzzy-Modelle für den Wärmestrom in Zone 1 und 2 des Druckbehälters zugrunde liegen. Dabei bilden die Daten, die mit 'X' gekennzeichnet sind, die Referenzarbeitspunkte. Die Daten in Form von *.xy Dateien dienen dem Funktionsnachweis des Verfahrens. Die mit 'O' gekennzeichneten Experimente dienen dem Nachweis des Gültigkeitsbereiches des Verfahrens. Das heißt, daß für die unbekanntenen Anfangszustände innerhalb des erarbeiteten Fuzzy-Kennfeldes eine Interpolation erfolgen muß.

Tabelle A1-3: Simulationen mittels ATHLET-Code mit Variation des Anfangsdruckes p_{z0} und des Anfangsmassenfüllstandes h_{z0} zum Prozeßzeitpunkt Zustand 0 ($d_{BI} = 2$ und 5 mm); **X** - Referenzdatensätze zum Nachweis der Funktionsfähigkeit; **O** - Datensätze zum Nachweis des Gültigkeitsbereiches

Simulationen	$p_{z0}=1.4$ [MPa]	$p_{z0}=1.6$ [MPa]	$p_{z0}=1.8$ [MPa]	$p_{z0}=2.0$ [MPa]	$p_{z0}=2.2$ [MPa]	$p_{z0}=2.4$ [MPa]
$h_{z0} = 120$ cm	X (Exp. 1 und 2)	O (Exp. 3)	X (Exp. 4 und 5)	O (Exp. 6)	O (Exp. 7)	X (Exp. 8 und 9)
$h_{z0} = 140$ cm	O (Exp. 10)	-	-	-	-	O (Exp. 11)
$h_{z0} = 160$ cm	X (Exp. 12 und 13)	-	-	-	-	X (Exp. 14 und 15)

A 1.2.2 Experimentreihe 2

Die Experimente der Reihe 2 wurden ohne das Nahbereichsmeßsystem mit dem Zweikammerpegelgefäß durchgeführt. Dazu wurde das Zweikammerpegelgefäß demontiert. Die Verifikation der Ergebnisse der ATHLET-Code Nachrechnungen bezüglich der Füllstandsaufspreizung erfolgte mit Hilfe der gemessenen Massenfüllstände der Nahbereichsmeßsysteme mit EKPG (Meßbereich 1,0 m bis 2,8 m) und NKPG (Meßbereich 0,8 m bis 1,8 m).

Der Anfangsdruck wurde in drei Stufen variiert ($p_0 = 1,4$ MPa, $p_0 = 1,8$ MPa, $p_0 = 2,2$ MPa). Als Enddruck jedes Abblaseexperimentes wurde $p_E = 0,7$ MPa gewählt. Damit ergeben sich unterschiedliche Abblasezeiten. Die Variation des Anfangsmassenfüllstandes erfolgte in sechs Stufen ($h_0 = 1,05$ m; $h_0 = 1,15$ m; $h_0 = 1,35$ m; $h_0 = 1,55$ m; $h_0 = 1,70$ m; $h_0 = 1,95$ m). Die Anfangsfüllstände wurden unter Berücksichtigung der Geometrie und der Instrumentierung gewählt.

Für die Experimentreihe 2 wurde durch den in der Abblaseleitung verwendeten unterschiedlichen Blendendurchmesser ($d_{Bl} = 2$ mm (klein) oder 5 mm (groß)) die maximal erreichten Werte der Druckänderungsgeschwindigkeit variiert. Die Tabelle A1-4 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Experimente der Experimentreihe 2, bei der die kleine Blende zum Einsatz kam.

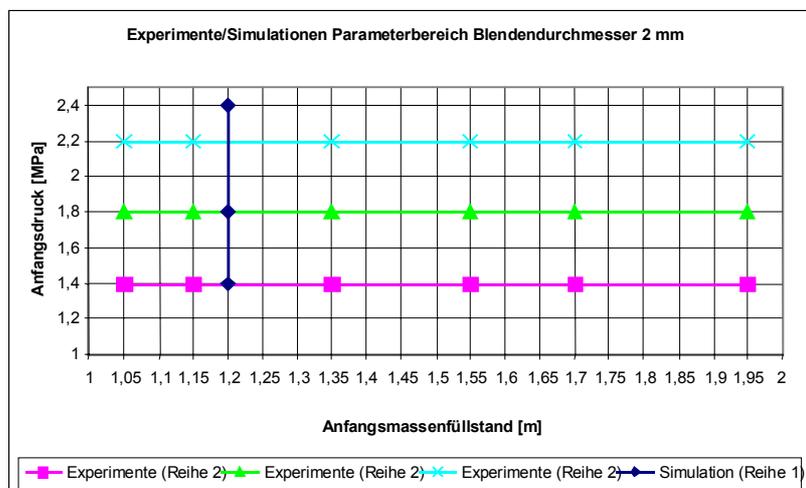
Tabelle A1-4: Übersicht zu den Ablaseexperimenten der Experimentreihe 2 ($d_{BI} = 2 \text{ mm}$)

a) Tabellarische Aufstellung mit den Anfangs- und Endwerten von Druck und Massenfüllstand und der Zeitdauer der Druckentlastung

b) Matrix der Anfangsbedingungen

Bezeichnung des Experimentes	Durchmesser Blende d_{BI} in mm	Anfangsdruck p_{z0} in MPa	Enddruck p_E in MPa	Anfangsmassenfüllstand h_{z0} in m	Endmassenfüllstand h_E in m	Zeitdauer der Druckentlastung t_{BD} in s
16 - BD14h195	2	1,4	0,7	1,93	1,69	290
17 - BD14h170	2	1,4	0,7	1,77	1,55	265
18 - BD14h154	2	1,4	0,7	1,56	1,37	240
19 - BD14h134	2	1,4	0,7	1,35	1,18	220
20 - BD14h115	2	1,4	0,7	1,13	0,99	190
21 - BD14h103	2	1,4	0,7	1,03	0,90	180
22 - BD18h195	2	1,8	0,7	1,94	1,60	367
23 - BD18h170	2	1,8	0,7	1,70	1,40	325
24 - BD18h155	2	1,8	0,7	1,55	1,27	302
25 - BD18h135	2	1,8	0,7	1,34	1,09	270
26 - BD18h115	2	1,8	0,7	1,14	0,93	240
27 - BD18h104	2	1,8	0,7	1,05	0,85	230
28 - BD22h195	2	2,2	0,7	1,94	1,50	420
29 - BD22h170	2	2,2	0,7	1,66	1,29	365
30 - BD22h155	2	2,2	0,7	1,52	1,17	345
31 - BD22h135	2	2,2	0,7	1,36	1,04	320
32 - BD22h115	2	2,2	0,7	1,14	0,88	280
33 - BD22h103	2	2,2	0,7	1,02	0,78	255

a)



b)

Die Tabelle A1-5 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Experimente der Experimentreihe 2, bei der die große Blende zum Einsatz kam.

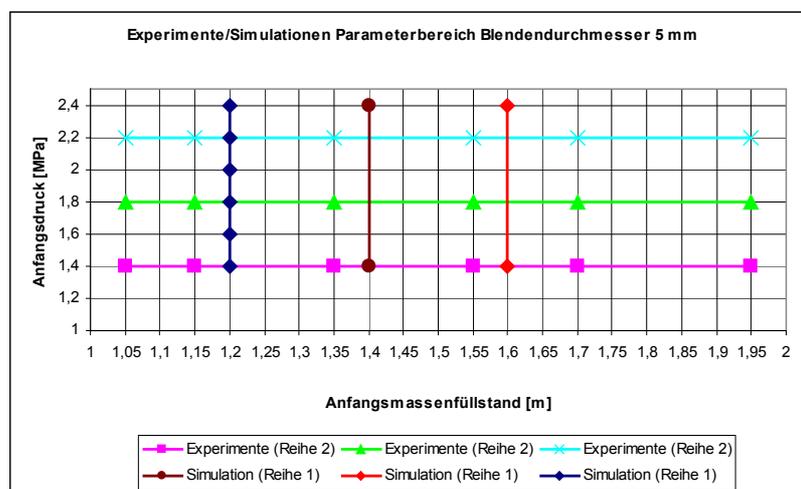
Tabelle A1-5: Übersicht zu den Ablaseexperimenten der Experimentreihe 2 ($d_{BI} = 5 \text{ mm}$)

a) Tabellarische Aufstellung mit den Anfangs- und Endwerten von Druck und Massenfüllstand und der Zeitdauer der Druckentlastung

b) Matrix der Anfangsbedingungen

Bezeichnung des Experimentes	Durchmesser Blende d_{BI} in mm	Anfangsdruck p_0 in MPa	Enddruck p_E in MPa	Anfangsmassenfüllstand h_0 in m	Endmassenfüllstand h_E in m	Zeitdauer der Druckentlastung t_{BD} in s
34 - BD14h195	5	1,4	0,7	1,95	1,68	60
35 - BD14h170	5	1,4	0,7	1,69	1,46	50
36 - BD14h154	5	1,4	0,7	1,57	1,35	51
37 - BD14h134	5	1,4	0,7	1,35	1,17	43
38 - BD14h115	5	1,4	0,7	1,14	0,98	38
39 - BD14h103	5	1,4	0,7	1,03	0,88	36
40 - BD18h195	5	1,8	0,7	1,91	1,55	72
41 - BD18h170	5	1,8	0,7	1,70	1,37	65
42 - BD18h155	5	1,8	0,7	1,54	1,24	61
43 - BD18h135	5	1,8	0,7	1,33	1,07	55
44 - BD18h115	5	1,8	0,7	1,13	0,91	50
45 - BD18h104	5	1,8	0,7	1,04	0,84	48
46 - BD22h195	5	2,2	0,7	1,92	1,46	80
47 - BD22h170	5	2,2	0,7	1,70	1,30	72
48 - BD22h155	5	2,2	0,7	1,54	1,17	64
49 - BD22h135	5	2,2	0,7	1,35	1,02	61
50 - BD22h115	5	2,2	0,7	1,14	0,87	53
51 - BD22h103	5	2,2	0,7	1,03	0,79	50

a)



b)

Tabelle A1-6: Simulationen mittels ATHLET mit Variation des Anfangsdruckes p_{z0} und des Anfangsmassenfüllstandes h_{z0} zum Nachweis der Gültigkeitsbereich des Fuzzy-Gemischfüllstandsmodells ($d_{Bl} = 3$ und 4 mm ♦)

Simulationen	$p_{z0}=1.4$ [MPa]	$p_{z0}=2.2$ [MPa]
$h_{z0} = 105$ cm	♦ Exp. 52	♦ Exp. 53
$h_{z0} = 195$ cm	♦ Exp. 54	♦ Exp. 55

Desweiteren wurden Simulationen mit dem ATHLET-Code für andere Blendendurchmesser mit den Anfangsbedingungen entsprechend dieser Experimente vorgenommen (Tabelle A1-6, Bezeichnung entsprechend oben), um eine erweiterte Datenbasis für die Verifikation der Fuzzy-Modelle zu generieren.

Die Daten der mit 'X' gekennzeichneten Referenzarbeitspunkte liegen der Erstellung der Fuzzy-Modelle für den Massenfüllstand (Nahbereich) und den Gemischfüllstand zugrunde (Tabelle A1-7). Die Daten in Form von *.xy Dateien dienen dem Funktionsnachweis des Verfahrens. Die mit 'O' gekennzeichneten Experimente dienen der Verifikation des Gültigkeitsbereiches des Verfahrens. Das heißt, daß für die unbekanntenen Anfangszustände innerhalb des generierten Fuzzy-Kennfeldes eine Interpolation erfolgen muß.

Tabelle A1-7: Experimente mit Variation des Anfangsdruckes p_{z0} und des Anfangsmassenfüllstandes h_{z0} zum Nachweis der Funktionsfähigkeit und des Gültigkeitsbereiches der Fuzzy-Modelle ($d_{Bl} = 2$ und 5 mm) zum Prozeßzeitpunkt Zustand 0

Experimente	$p_{z0} = 2.2$ MPa	$p_{z0} = 1.8$ MPa	$p_{z0} = 1.4$ MPa
$h_{z0} = 195$ cm	X (Exp. 28 und 46)	O (Exp. 22 und 40)	X (Exp. 16 und 34)
$h_{z0} = 170$ cm	O (Exp. 29 und 47)	O (Exp. 23 und 41)	O (Exp. 17 und 35)
$h_{z0} = 155$ cm	X (Exp. 30 und 48)	O (Exp. 24 und 42)	X (Exp. 18 und 36)
$h_{z0} = 135$ cm	O (Exp. 31 und 49)	O (Exp. 25 und 43)	O (Exp. 19 und 37)
$h_{z0} = 115$ cm	O (Exp. 32 und 50)	O (Exp. 26 und 44)	O (Exp. 20 und 38)
$h_{z0} = 105$ cm	X (Exp. 33 und 51)	O (Exp. 27 und 45)	X (Exp. 21 und 39)

A 1.2.3 Versuchsablauf

⇒ Versuchsbeginn

1. Auffüllen des Druckbehälters und des Störgefäßes mit Wasser
2. Aufheizen der beiden Behälter bis zum Siedezustand (siedendes Wasser-Dampf Gemisch) mit den in den Behältern vorhandenen Heizungen
3. Halten des Siedezustandes
4. Entlüften der Pegelgefäße
5. Einstellen des jeweiligen Anfangsmassenfüllstandes
6. Erneutes Aufheizen
7. Ausschalten der Heizungen
8. Erreichen des stationären Zustandes
9. Öffnen des Abblaseventils
10. Schließen des Ventils nach Erreichen des gewünschten Enddrucks von 0,7 MPa

⇒ Versuchsende

A 1.3 Nachrechnung der Experimente mittels ATHLET

Von den Experimenten der Experimentreihe 1 wurden die drei Vorexperimente 1-3 mit Hilfe des ATHLET-Codes nachgerechnet [Käst96; Hamp99-1]. Die nach der Umrüstung der Versuchsanlage durchgeführten Experimente der Experimentreihe 2 wurden komplett nachgerechnet [Hamp99-1].

Anhand des Experimentes 47 werden die Ergebnisse der ATHLET-Nachrechnung mit den gemessenen Prozeßverläufen verglichen. Bei diesem Experiment wurde der Druck von $p_A = 2,2$ MPa auf $p_E = 0,7$ MPa reduziert. Zwischen dem gemessenen und dem berechneten Druckverlauf sowie den stationären Anfangs- und Endwerten wurde im wesentlichen Übereinstimmung erzielt (Bild A1-4).

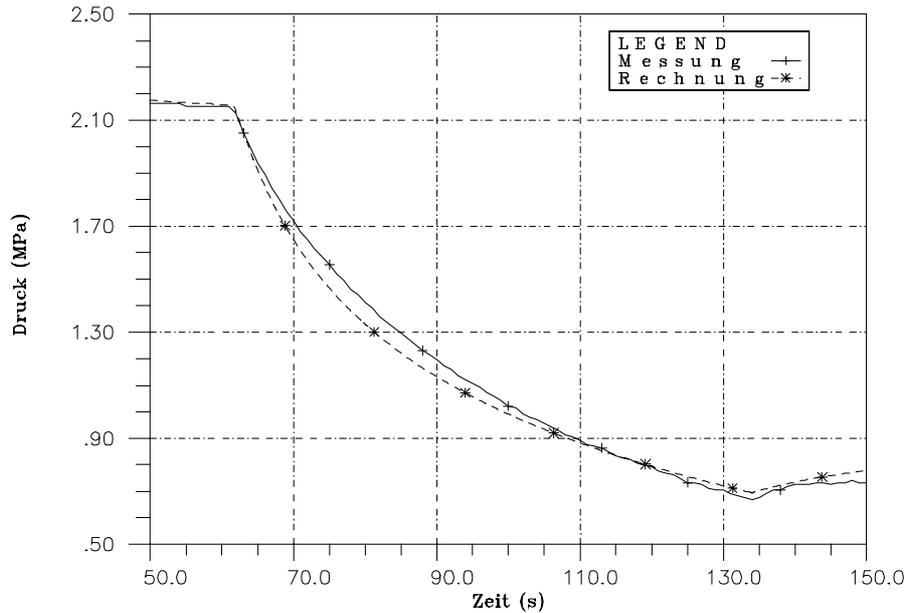


Bild A1-4: Gemessener und berechneter Druckverlauf

Die gemessenen Füllstandsverläufe für den Massenfüllstand (Weitbereich), den Massenfüllstand (Nahbereich) und den Massenfüllstand des Nullkammerpegelgefäßes wurden durch die ATHLET-Nachrechnung im wesentlichen nachgebildet. Im Ergebnis der Nachrechnungen kann durch die ATHLET-Simulation der Verlauf der nichtmeßbaren Größe Gemischfüllstand bereitgestellt werden (Bild A1-5) [Hamp99-1].

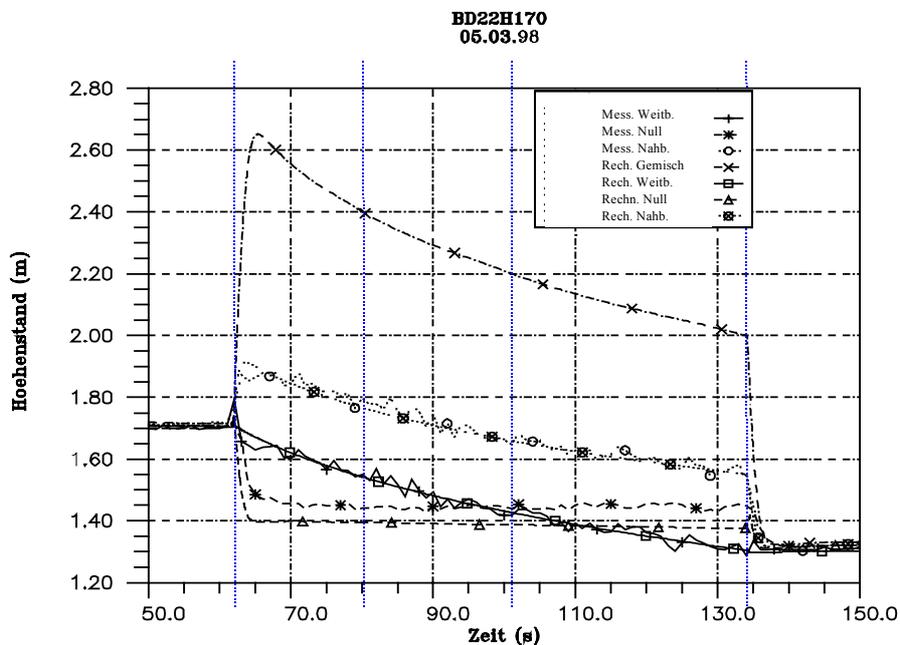


Bild A1-5: Verläufe gemessener und berechneter Massenfüllstand (Weitbereich, Nahbereich), Massenfüllstand (Nullkammerpegelgefäß) und berechneter Gemischfüllstand

Der mittels ATHLET berechnete zeitliche Verlauf des Gemischfüllstandes wird durch die gemessenen Signale einer Leitfähigkeitssonden-Sonderinstrumentierung (Detektion des

Gemischfüllstandsdurchganges) bestätigt. Sowohl bei der Simulation als auch bei der Messung passiert der Gemischfüllstand die Sondenposition 2,4 m bei $t \approx 62$ s (Aufschäumen zu Beginn der Störung) und $t \approx 80$ s. In diesem Zeitraum detektiert die Nadelsonde ein Gemisch aus Wasser und Dampf. Ausführliche Erläuterungen dazu sind in [Hamp99-1] zu finden.

A 1.4 Datenanalyse

Aus den Nachrechnungen der Experimente wurden für die wesentlichen prozeßbeschreibenden Größen ATHLET-Daten gewonnen, die für die folgenden vier markanten Prozeßzustände erfaßt wurden:

- Zustand 0:** Zeitpunkt kurz vor dem Öffnen des Abblaseventils, bei dem die Heizung abgeschaltet ist, Anfangszustand
(Z0)
- Zustand 1:** Zeitpunkt kurz nach dem Öffnen des Abblaseventils, bei dem die Maxima der Parameter erreicht werden (Füllstandsaufspreizung, Druckänderungsgeschwindigkeit), Anfangsphase des Druckentlastungsvorganges
(Z1)
- Zustand 2:** Zeitpunkt kurz vor dem Schließen des Abblaseventils, bei dem die Füllstandsaufspreizung noch markant ist, Endphase des Druckentlastungsvorganges
(Z2)
- Zustand 3:** Zeitpunkt kurz nach dem Schließen des Abblaseventils, bei dem die Druckstörung beendet und die Füllstandsaufspreizung abgebaut ist, Endzustand
(Z3)

Das Bild A1-6 veranschaulicht die Wahl der Prozeßzustände anhand der Füllstandsverläufe.

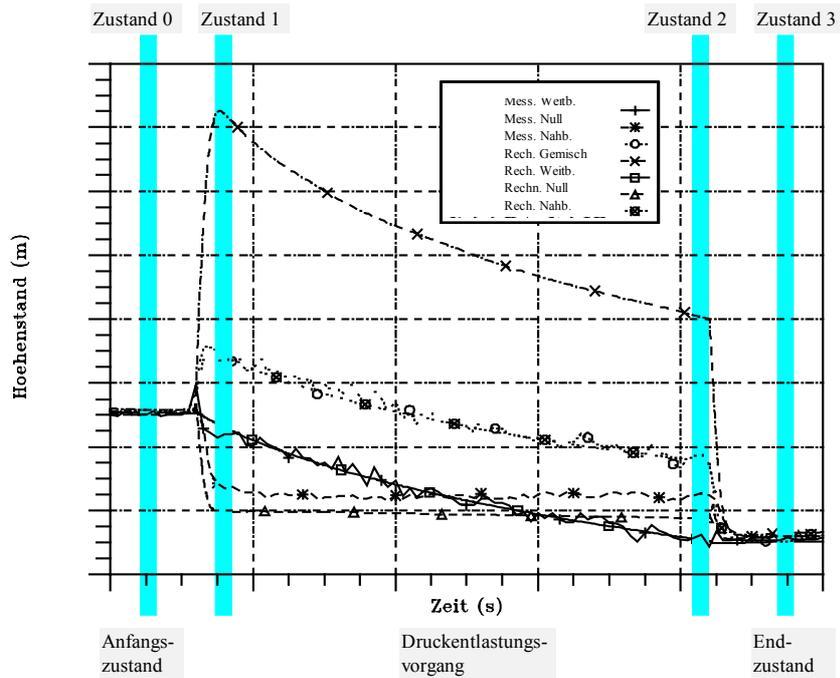


Bild A1-6: Darstellung der Prozeßzustände für die Datenanalyse

Auf der Grundlage dieser ATHLET-Daten wurden markante prozeßbeschreibende Größen hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von den Parametern Anfangsdruck und Anfangsmassenfüllstand analysiert [Hamp99-2]. Die Ergebnisse der Datenanalyse werden anhand der Experimentreihe 2 veranschaulicht.

A 1.4.1 Datenanalyse der Experimentreihe 2 (kleine Blende)

Im Bild A1-7 erfolgt die Darstellung der maximalen Druckänderungsgeschwindigkeit (Zustand 1) in Abhängigkeit des Anfangsdruckes und des Anfangsmassenfüllstandes. Mit zunehmendem Anfangsdruck wird der Betrag der maximalen Druckänderungsgeschwindigkeit größer. Mit zunehmendem Anfangsmassenfüllstand nimmt der Betrag der maximalen Druckänderungsgeschwindigkeit ab.

Das Bild A1-8 zeigt die Abhängigkeit der Änderung des Massenfüllstandes (Weitbereich) (Änderung zwischen dem Massenfüllstand (Weitbereich) Zustand 0 (Z0) und Zustand 3 (Z3)) vom Anfangsdruck und vom Anfangsmassenfüllstand. Mit zunehmendem Anfangsdruck und mit zunehmendem Anfangsmassenfüllstand wird der Betrag der Änderung des Massenfüllstandes (Weitbereich) größer.

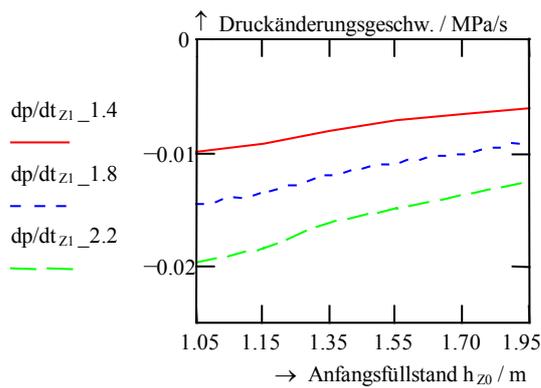


Bild A1-7: Maximale Druckänderungsgeschwindigkeit (Z1)

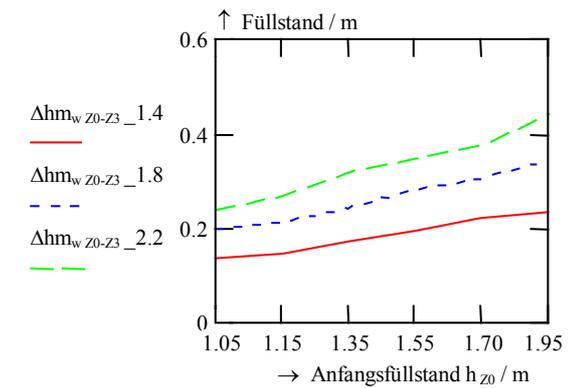


Bild A1-8: Füllstandsänderung Massenfüllstand (Weitbereich) (Z0-Z3)

Die maximale Druckänderungsgeschwindigkeit und die Füllstandsänderung infolge des Druckentlastungsvorganges sind für die Experimentreihe 2 (kleine Blende) anhand der Größen Anfangsdruck und Anfangsmassenfüllstand unterscheidbar.

Das Bild A1-9 stellt die maximale Aufspreizung des Massenfüllstandes (Nahbereich) (Änderung zwischen dem Massenfüllstand (Nahbereich) Zustand 1 (Z1) und Zustand 0 (Z0)) in Abhängigkeit vom Anfangsdruck und vom Anfangsmassenfüllstand dar. Die Variation des Anfangsdruckes hat keinen dominanten Einfluß auf die Aufspreizung des Massenfüllstandes (Nahbereich). Mit zunehmendem Anfangsmassenfüllstand wird der Betrag der Füllstands-aufspreizung geringer, die Abhängigkeit vom Füllstand ist deutlich ausgeprägt.

Auch bei der maximalen Aufspreizung des Gemischfüllstandes (Änderung des Gemischfüllstandes zwischen den Zuständen Z1 und Z0) ist ein dominanter Einfluß des Anfangsdruckes nicht erkennbar (Bild A1-10). Mit zunehmendem Anfangsmassenfüllstand wird der Betrag der Gemischfüllstands-aufspreizung größer.

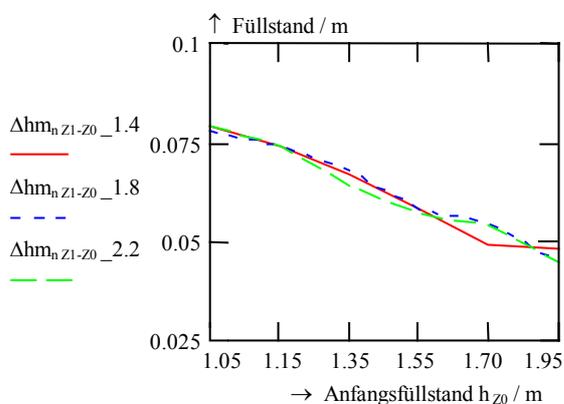


Bild A1-9: Füllstands-aufspreizung (Z1-Z0) Massenfüllstand (Nahbereich)

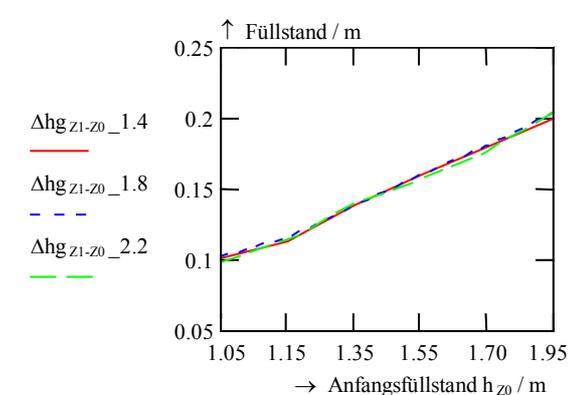


Bild A1-10: Füllstands-aufspreizung Gemischfüllstand (Z1-Z0)

Um die Aufspreizung des Massenfüllstandes (Nahbereich) und des Gemischfüllstandes zu beschreiben, reichen die beiden Prozeßinformationen Anfangsdruck und Anfangsmassenfüllstand nicht aus. Dazu sind weitere meßbare bzw. detektierbare Informationen wie z. B. die Füllstandsänderung (Massenfüllstand (Weitbereich)) oder die maximale Änderungsgeschwindigkeit notwendig.

In den Bildern A1-11 bis A1-13 werden die Füllstandsänderungen zwischen den Zuständen 1 (Z1) und 2 (Z2) für den Massenfüllstand (Weitbereich), den Massenfüllstand (Nahbereich) und den Gemischfüllstand für jeweils einen Anfangsdruck in Abhängigkeit des Anfangsmassenfüllstandes dargestellt. Mit zunehmendem Anfangsmassenfüllstand und Anfangsdruck nehmen die Beträge der Massenfüllstandsänderungen zu.

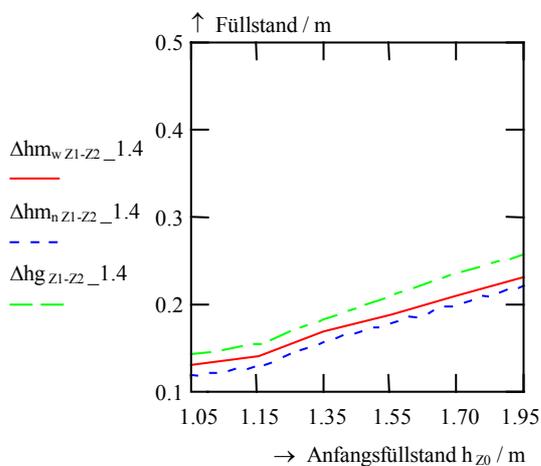


Bild A1-11: Füllstandsänderung Massenfüllstand (Nah-, Weitbereich), Gemischfüllstand (Z1-Z2)
 $p_{Z0} = 1,4 \text{ MPa}$

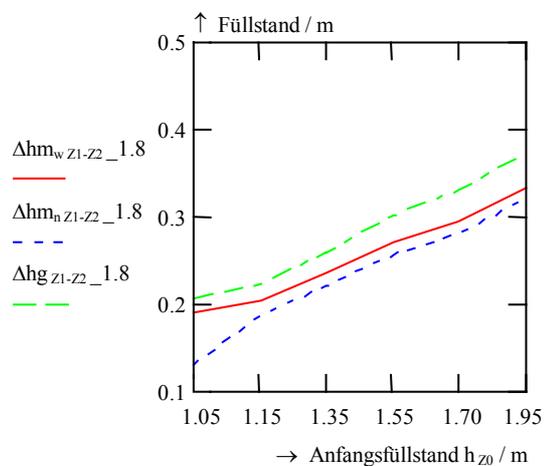


Bild A1-12: Füllstandsänderung Massenfüllstand (Nah-, Weitbereich), Gemischfüllstand (Z1-Z2)
 $p_{Z0} = 1,8 \text{ MPa}$

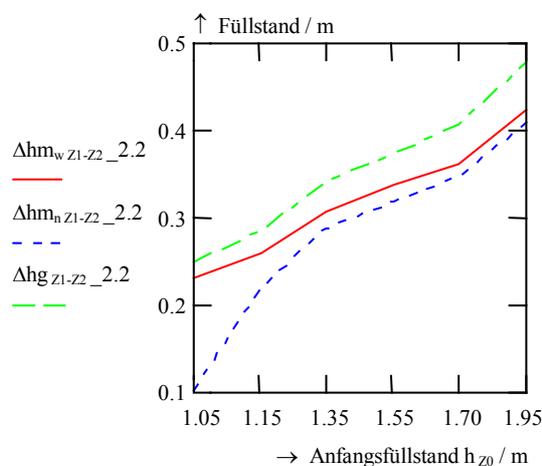


Bild A1-13: Füllstandsänderung Massenfüllstand (Nah-, Weitbereich), Gemischfüllstand (Z1-Z2), $p_{Z0} = 2,2 \text{ MPa}$

Für jeden Anfangsdruck ist der Betrag der Änderung des Massenfüllstandes (Nahbereich) kleiner und der Betrag der Gemischfüllstandsänderung größer als der Betrag der Änderung des Massenfüllstandes (Weitbereich). Bei den Änderungen des Massenfüllstandes (Nahbereich) für den Anfangsmassenfüllstand $h_{z0} = 1,05$ m wirkt sich die Meßbereichsunterschreitung (untere Meßbereichsgrenze 1,0 m) aus. Besonders deutlich erkennbar ist dies am veränderten Gradienten bei den Anfangsdrücken $p_{z0} = 1,8$ MPa und $p_{z0} = 2,2$ MPa in diesem Bereich der Diagramme. Davon abgesehen verlaufen die einzelnen Massenfüllstandsänderungen für die verschiedenen Anfangsdrücke nahezu parallel zueinander.

A 1.4.2 Datenanalyse der Experimentreihe 2 (große Blende)

Im Bild A1-14 erfolgt die Darstellung der maximalen Druckänderungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Anfangsdruckes und des Anfangsmassenfüllstandes. Mit zunehmendem Anfangsdruck wird der Betrag der maximalen Druckänderungsgeschwindigkeit größer. Mit zunehmendem Anfangsmassenfüllstand nimmt der Betrag der maximalen Druckänderungsgeschwindigkeit ab.

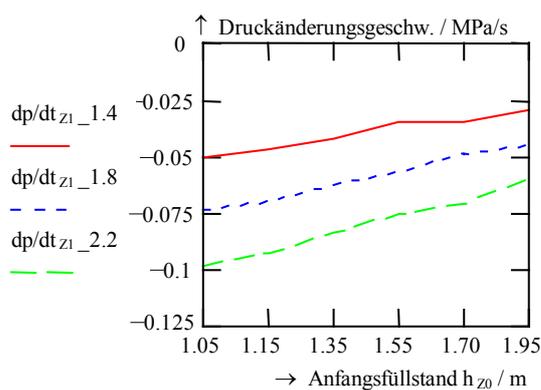


Bild A1-14: Maximale Druckänderungsgeschwindigkeit (Z1)

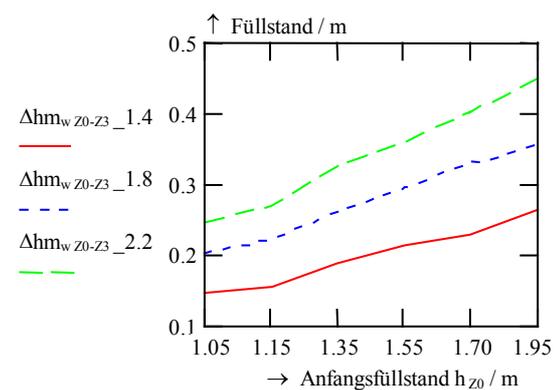


Bild A1-15: Füllstandsänderung Massenfüllstand (Weitbereich) (Z0-Z3)

Das Bild A1-15 zeigt die Abhängigkeit der Änderung des Massenfüllstandes (Weitbereich) (Änderung zwischen dem Massenfüllstand (Weitbereich) kurz vor Beginn und kurz nach Ende der Druckentlastung) vom Anfangsdruck und Anfangsmassenfüllstand. Mit zunehmendem Anfangsdruck und mit zunehmendem Anfangsmassenfüllstand wird der Betrag der Änderung des Massenfüllstandes (Weitbereich) größer. Die maximale Druckänderungsgeschwindigkeit und die Füllstandsänderung infolge des Druckentlastungsvorganges sind für die Experimentreihe 2 (große Blende) anhand der Größen Anfangsdruck und Anfangsmassenfüllstand unterscheidbar.

Das Bild A1-16 stellt die maximale Aufspreizung des Massenfüllstandes (Nahbereich) (Änderung zwischen dem Massenfüllstand (Nahbereich) kurz vor und kurz nach Beginn der Druckentlastung) in Abhängigkeit vom Anfangsdruck und vom Anfangsmassenfüllstand dar. Die Variation des Anfangsdruckes hat keinen dominanten Einfluß auf die Aufspreizung des Massenfüllstandes (Nahbereich). Mit zunehmendem Anfangsmassenfüllstand wird der Betrag der Füllstandsaufspreizung geringer, die Abhängigkeit ist hier deutlich ausgeprägt.

Zwischen den Anfangsfüllständen 1,70 m und 1,95 m ist eine deutliche Änderung des Gradienten des Massenfüllstandes (Nahbereich) erkennbar, die darauf zurückzuführen ist, daß bei den Experimenten mit dem Anfangsmassenfüllstand 1,95 m der Gemischfüllstand die obere Einbindung des Nahbereichsmeßsystems (2,8 m) überschreitet. Der Massenfüllstand (Nahbereich) wird begrenzt und weist deshalb eine geringere Aufspreizung auf.

Auch bei der maximalen Aufspreizung des Gemischfüllstandes (Änderung des Gemischfüllstandes zwischen den Werten kurz vor und kurz nach Beginn der Druckentlastung) ist ein dominanter Einfluß des Anfangsdruckes kaum erkennbar (Bild A1-17). Mit zunehmendem Anfangsmassenfüllstand wird der Betrag der Gemischfüllstandsaufspreizung größer.

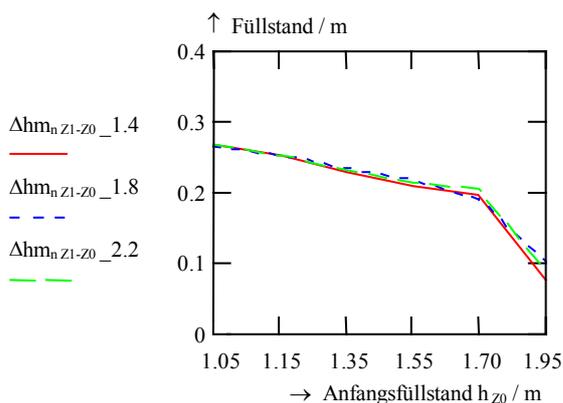


Bild A1-16: Füllstandsaufspreizung (Z1-Z0) Massenfüllstand (Nahbereich)

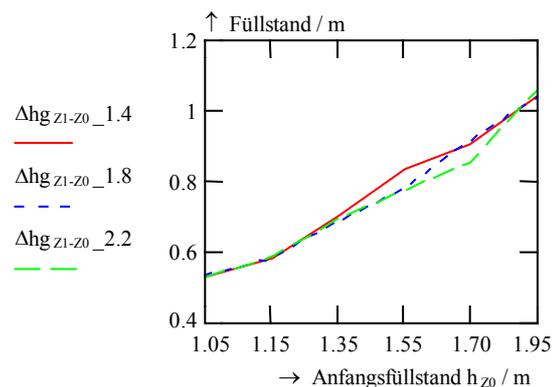


Bild A1-17: Füllstandsaufspreizung Gemischfüllstand (Z1-Z0)

Um die Aufspreizung des Massenfüllstandes (Nahbereich) und des Gemischfüllstandes zu beschreiben, reichen die beiden Prozeßinformationen Anfangsdruck und Anfangsmassenfüllstand nicht aus. Dazu sind weitere meßbare bzw. detektierbare Informationen notwendig, wie z. B. die Füllstandsänderung (Massenfüllstand (Weitbereich) entsprechend Bild A1-18) oder die maximale Füllstandsänderungsgeschwindigkeit.

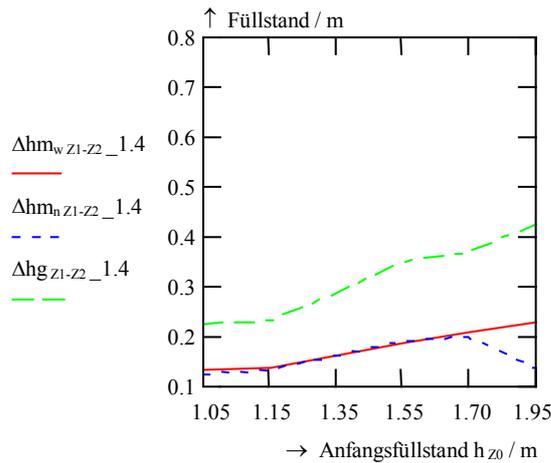


Bild A1-18: Füllstandsänderung Massenfüllstand (Nah-, Weitbereich), Gemischfüllstand (Z1-Z2), Anfangsdruck 1.4 MPa

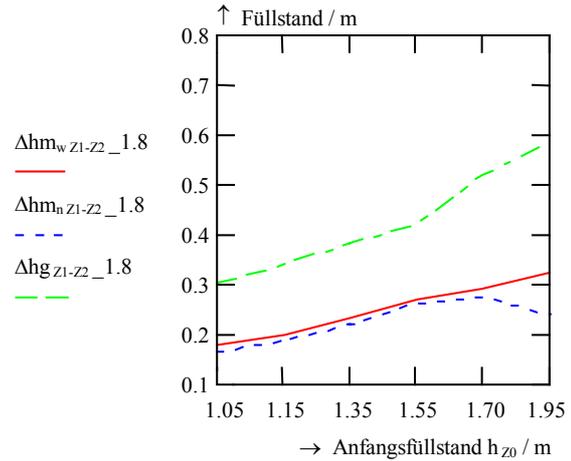


Bild A1-19: Füllstandsänderung Massenfüllstand (Nah-, Weitbereich), Gemischfüllstand (Z1-Z2), Anfangsdruck 1.8 MPa

Bei den Massenfüllstandsänderungen (Nahbereich) für den Anfangsmassenfüllstand $h_{z0} = 1,95$ m wirkt sich die Meßbereichsüberschreitung der oberen Meßbereichsgrenze (2,8 m) durch den Gemischfüllstand aus, erkennbar am geänderten Gradienten des Verlaufs in diesem Bereich des Diagramms. Der Effekt, der bei den Experimenten mit dem kleinen Blendendurchmesser erkennbar war, daß die jeweiligen Füllstandsänderungen für die einzelnen Anfangsdrücke nahezu parallel zueinander verlaufen, ist durch die höheren Druckänderungsgeschwindigkeiten hier nicht so ausgeprägt.

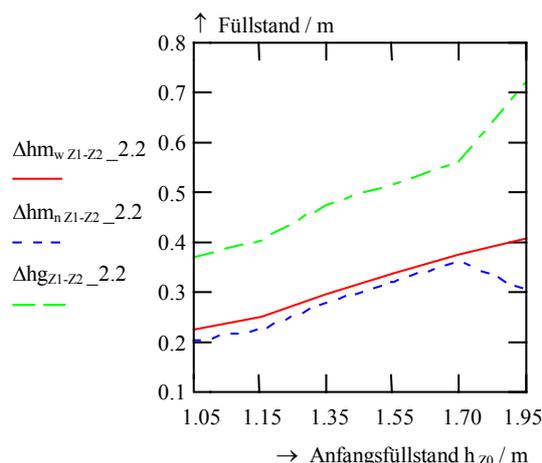


Bild A1-20: Füllstandsänderung Massenfüllstand (Nah-, Weitbereich), Gemischfüllstand (Z1-Z2), Anfangsdruck 2.2 MPa

In den Bildern A1-19 bis A1-20 werden die Füllstandsänderungen zwischen den Zuständen 1 (Z1) und 2 (Z2) für den Massenfüllstand (Weitbereich), den Massenfüllstand (Nahbereich) und den Gemischfüllstand für jeweils einen Anfangsdruck in Abhängigkeit des Anfangs-

füllstandes dargestellt. Mit zunehmendem Anfangsfüllstand und Anfangsdruck nehmen die Beträge der Füllstandsänderungen zu. Für jeden Anfangsdruck ist der Betrag der Änderung des Massenfüllstandes (Nahbereich) kleiner und der Betrag der Gemischfüllstandsänderung größer als der Betrag der Änderung des Massenfüllstandes (Weitbereich).

A 1.5 Darstellung ausgewählter Prozeßdaten für Referenzarbeitspunkte

Aus der Fülle der generierten Daten wurden für den Entwurf der Fuzzy-Algorithmen anhand des variierten Anfangsdruckes und Anfangsmassenfüllstandes Referenzarbeitspunkte ausgewählt, die den technisch relevanten Parameterbereich für die Prozeßbeschreibung abdecken. Wie die obenstehende Tabelle A1-7 zeigt, wurden definierte Abblaseexperimente als Referenzarbeitspunkte ausgewählt. Diese Transienten bilden für die methodischen Untersuchungen die Grundlage für die Ableitung von weiteren, notwendigen Prozeßinformationen und die Generierung der Fuzzy-Modelle. Im folgenden werden die mit DynStar erstellten Abbildungen für ausgewählte Prozeßdaten sowie deren zeitliche Ableitungen präsentiert.

A 1.5.1 Referenzarbeitspunkte der Abblaseexperimente mit der kleinen Blende

Die Bilder A1-21 bis A1-23 zeigen ausgewählte zeitliche Verläufe der Meßgrößen und deren zeitliche Ableitungen für die Experimente mit der kleinen Blende. Das Bild A1-21 präsentiert den Verlauf des Massenfüllstandes (Weitbereich) hm_w und dessen zeitliche Ableitung Massenfüllstandsänderungsgeschwindigkeit dhm_w/dt im Ausschnitt $t = 50...90$ s des Simulationszeitbereiches. Anhand der Kurvenverläufe für dhm_w/dt wird der maximale Betrag der Massenfüllstandsänderungsgeschwindigkeit während des Experimentes bestimmt. Mit abnehmendem Anfangsdruck und Anfangsmassenfüllstand wird der maximale Betrag des Gradienten des Massenfüllstandes (Weitbereich) geringer. Eine Zuordnung des Maximums der Massenfüllstandsänderungsgeschwindigkeit (Weitbereich) zu den Größen Anfangsdruck und Anfangsmassenfüllstand ist ausreichend genau gegeben.

↑ Massenfüllstand (Weitbereich) hm_w (m), Massenfüllstandsänderungsgeschwindigkeit dhm_w/dt (m/s)

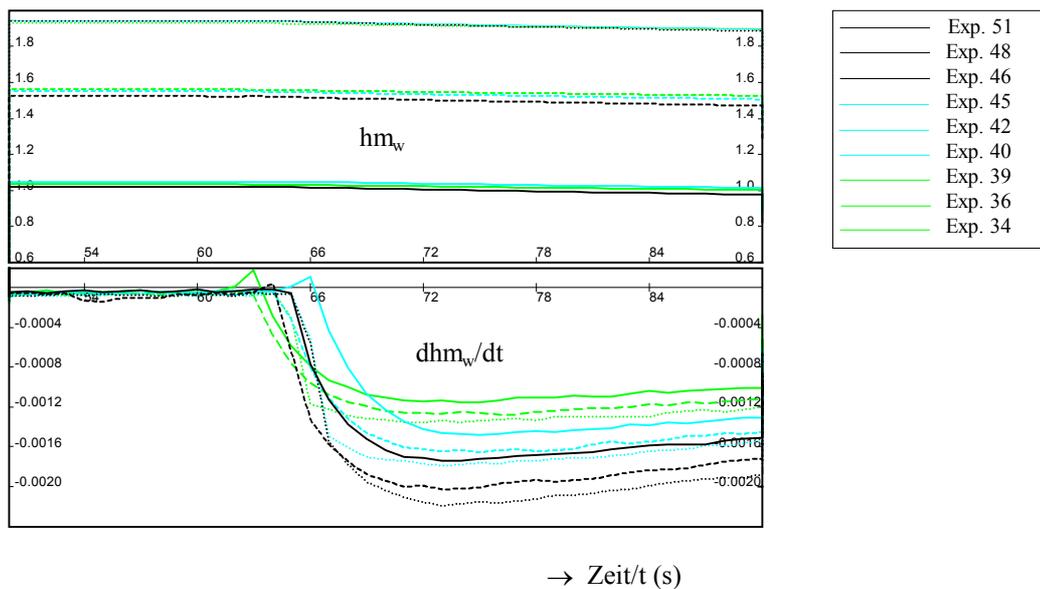


Bild A1-21: Darstellung der zeitlichen Verläufe des Massenfüllstandes (Weitbereich) hm_w und der Massenfüllstandsänderungsgeschwindigkeit dhm_w/dt für die Transienten der Referenzarbeitspunkte im Simulationszeitbereich $t = 50 \dots 90$ s

Ausgehend von den Ergebnissen der Datenanalyse (A1) werden Verhältnisfaktoren auf der Basis des direkt meßbaren Massenfüllstandes (Weitbereich) hm_w gebildet.

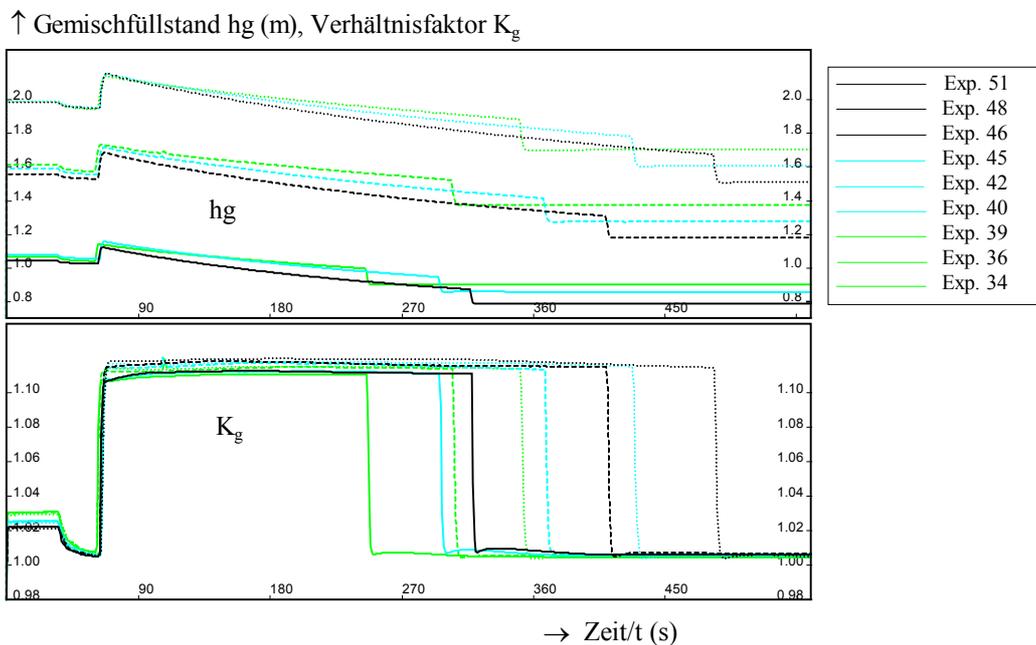


Bild A1-22: Darstellung der zeitlichen Verläufe des Gemischfüllstandes hg und des Verhältnisfaktors für den Gemischfüllstand K_g für die Transienten der Referenzarbeitspunkte

Bild A1-22 zeigt die zeitlichen Verläufe des Gemischfüllstandes hg und des Verhältnisfaktors K_g für den Gemischfüllstand. Bei diesem Faktor handelt es sich um das Verhältnis der globalen Größen Gemischfüllstand und Massenfüllstand (Weitbereich) nach Gleichung (A1.2):

$$K_g = \frac{hg}{hm_w} \quad (\text{A1.2})$$

Der Verhältnisfaktor ändert sich nur geringfügig in Abhängigkeit der Größen Anfangsdruck und Anfangsmassenfüllstand. Der zeitliche Verlauf des Verhältnisfaktors ist für die ausgewerteten Experimente nahezu konstant während des Druckentlastungsvorganges, d. h. eine besondere Dynamik des Verhältnisfaktors ist nicht zu berücksichtigen.

Bild A1-23 zeigt die zeitlichen Verläufe des Verhältnisfaktors K_n für den Massenfüllstand (Nahbereich) und dessen zeitliche Ableitung dK_n/dt im Ausschnitt $t=50 \dots 90$ s des Simulationszeitbereiches. Bei diesem Faktor handelt es sich um das Verhältnis der lokalen Größe Massenfüllstand (Nahbereich) und der globalen Größe Massenfüllstand (Weitbereich) nach Gleichung (A1.3):

$$K_n = \frac{hm_n}{hm_w} \quad (\text{A1.3})$$

Der Verhältnisfaktor K_n ändert sich geringfügig in Abhängigkeit der Größe Anfangsdruck, aber deutlich in Abhängigkeit der Größe Anfangsmassenfüllstand. Der zeitliche Verlauf des Verhältnisfaktors ist nicht konstant während des Druckentlastungsvorganges, d. h. die Dynamik des Verhältnisfaktors ist bei einer Modellerstellung zu berücksichtigen.

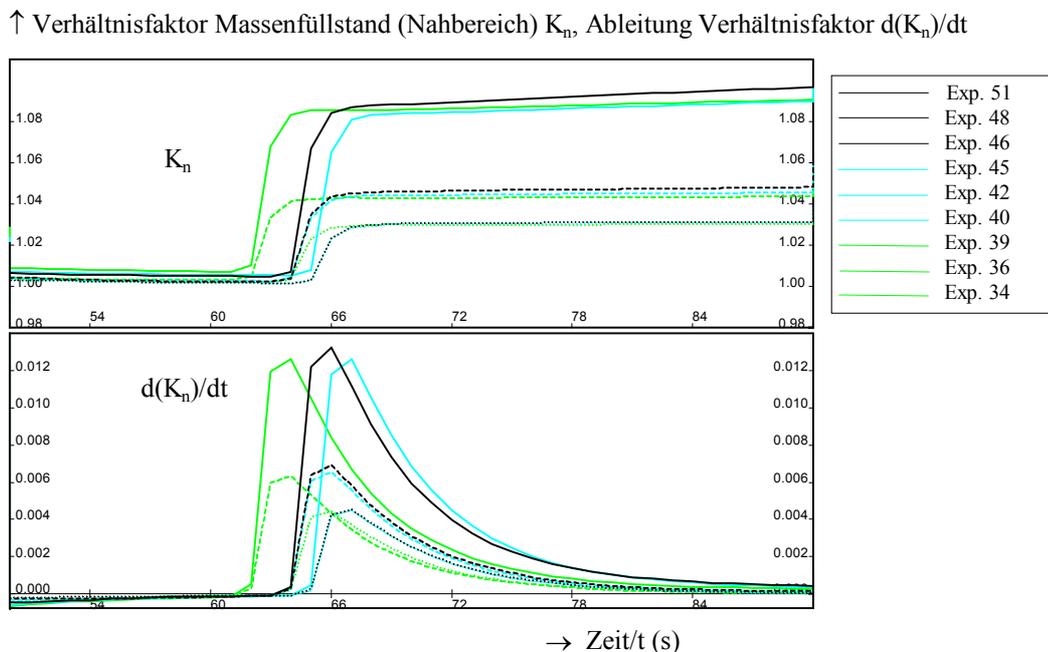


Bild A1-23: Darstellung der zeitlichen Verläufe des Verhältnisfaktors für den Massenfüllstand (Nahbereich) K_n und dessen zeitliche Ableitung $d(K_n)/dt$ für die Transienten der Referenzarbeitspunkte im Simulationszeitbereich $t = 50 \dots 90$ s

A 1.5.2 Referenzarbeitspunkte der Abblaseexperimente mit der großen Blende

Die Bilder A1-24 bis A1-26 zeigen ausgewählte zeitliche Verläufe der Meßgrößen und deren zeitliche Ableitungen für die Experimente mit der großen Blende. Das Bild A1-24 präsentiert den Verlauf des Massenfüllstandes (Weitbereich) hm_w und dessen zeitliche Ableitung Massenfüllstandsänderungsgeschwindigkeit (Weitbereich) dhm_w/dt im Ausschnitt $t = 50 \dots 90$ s des Simulationszeitbereiches. Mit abnehmendem Anfangsdruck und Anfangsmassenfüllstand wird der Gradient des Massenfüllstandes (Weitbereich) geringer. Eine Zuordnung des Maximums der Massenfüllstandsänderungsgeschwindigkeit (Weitbereich) zu den Größen Anfangsdruck und Anfangsmassenfüllstand ist ausreichend genau gegeben.

↑ Massenfüllstand (Weitbereich) hm_w (m), Massenfüllstandsänderungsgeschwindigkeit dhm_w/dt (WB) (m/s)

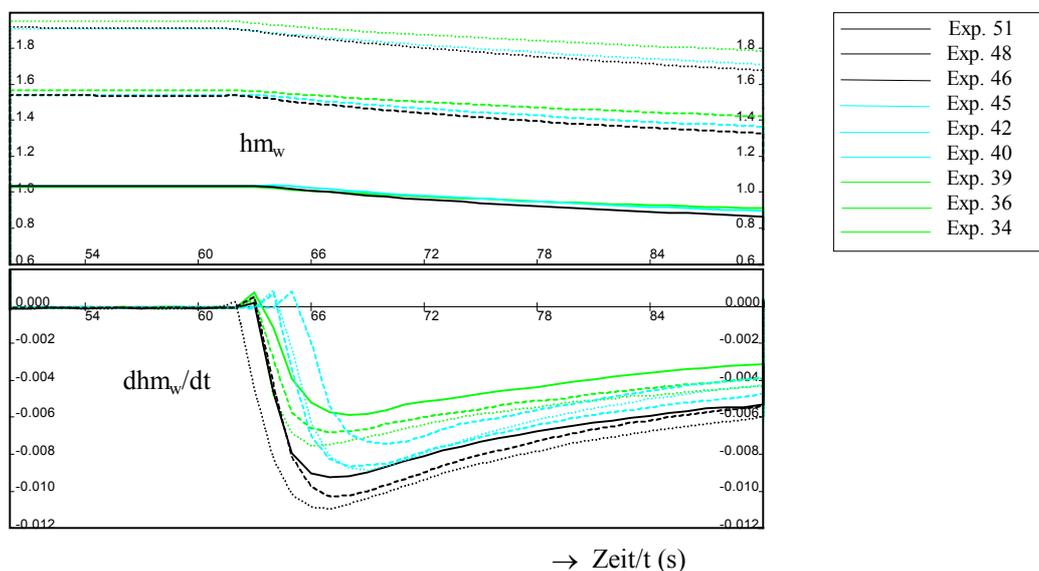


Bild A1-24: Darstellung der zeitlichen Verläufe des Massenfüllstandes (Weitbereich) hm_w und der Massenfüllstandsänderungsgeschwindigkeit (Weitbereich) dhm_w/dt für die Transienten der Referenzarbeitspunkte im Simulationszeitbereich $t = 50 \dots 90$ s

Ausgehend von den Ergebnissen der Datenanalyse wurden, wie in Abschnitt A 1.5.1, Verhältnisfaktoren auf der Basis des direkt meßbaren Massenfüllstandes (Weitbereich) gebildet.

Bild A1-25 zeigt die zeitlichen Verläufe des Gemischfüllstandes hg und des Verhältnisfaktors für den Gemischfüllstand K_g . Der Verhältnisfaktor beschreibt das Verhältnis der globalen Größen Gemischfüllstand und Massenfüllstand (Weitbereich). Der Verhältnisfaktor K_g ändert sich nur geringfügig in Abhängigkeit der Größen Anfangsdruck und Anfangsmassenfüllstand. Der zeitliche Verlauf des Verhältnisfaktors ist während des Druckentlastungsvorganges nahezu konstant, d. h. eine Dynamik des Verhältnisfaktors ist bei der Modellierung nicht zu berücksichtigen.

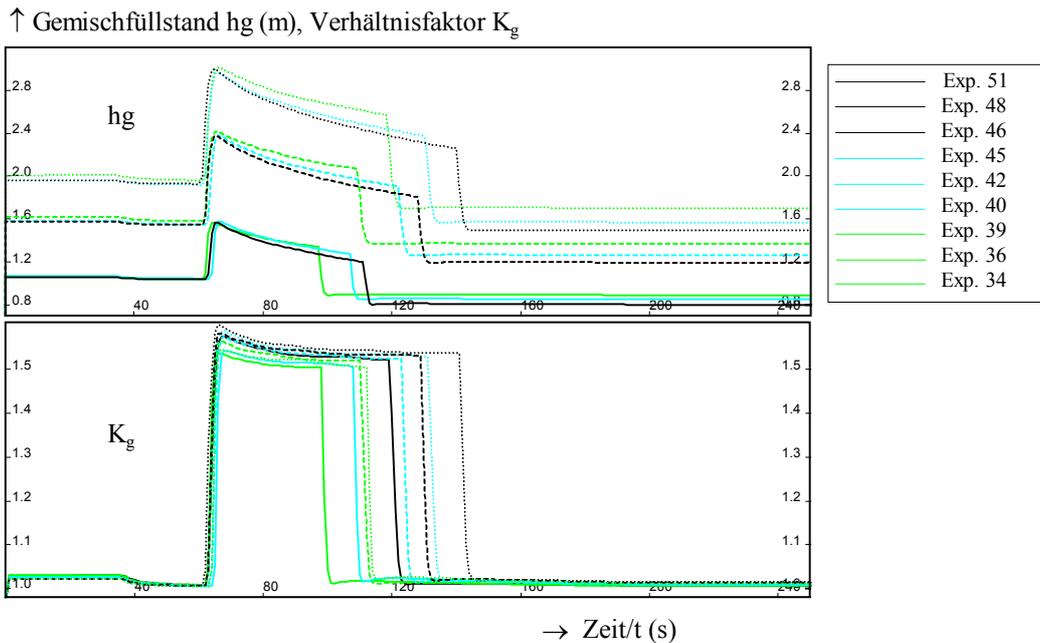


Bild A1-25: Darstellung der zeitlichen Verläufe des Gemischfüllstandes h_g und des Verhältnisfaktors für den Gemischfüllstand K_g für die Transienten der Referenzarbeitspunkte

Bild A1-26 zeigt die zeitlichen Verläufe des Verhältnisfaktors K_n für den Massenfüllstand (Nahbereich) und dessen zeitliche Ableitung im Ausschnitt $t=50 \dots 90$ s des Simulationszeitbereiches. Bei diesem Faktor handelt sich um das Verhältnis der lokalen Größe Massenfüllstand (Nahbereich) h_{m_n} und der globalen Größe Massenfüllstand (Weitbereich) h_{m_w} .

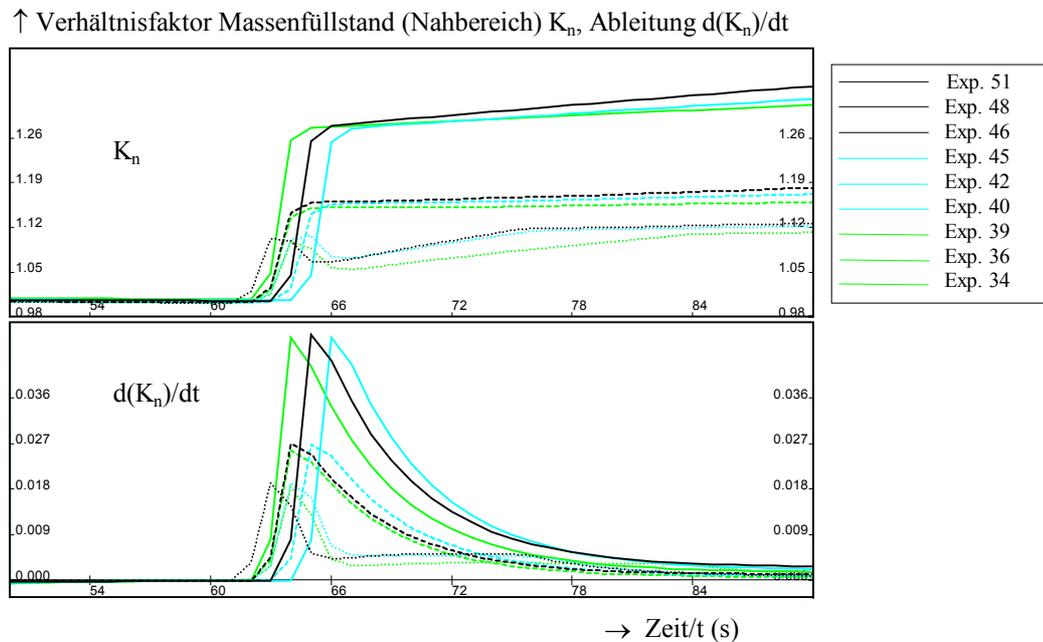


Bild A1-26: Darstellung der zeitlichen Verläufe des Verhältnisfaktors für den Massenfüllstand (Nahbereich) K_n und dessen zeitliche Ableitung $d(K_n)/dt$ für die Transienten der Referenzarbeitspunkte im Simulationszeitbereich $t = 50 \dots 90$ s

Der Verhältnisfaktor ändert sich geringfügig in Abhängigkeit der Größe Anfangsdruck, aber deutlich in Abhängigkeit der Größe Anfangsmassenfüllstand. Der zeitliche Verlauf des Verhältnisfaktors ist während des Druckentlastungsvorganges nicht konstant, d. h. die Dynamik des Verhältnisfaktors ist bei der Modellbildung zu berücksichtigen. Die Aufspreizung des Verhältnisfaktors K_n für den Anfangsmassenfüllstand (1,05 m) ist auf die Meßbereichsunterschreitung zurückzuführen. Die Überschreitung der oberen Meßbereichsgrenze durch den Gemischfüllstand h_g ist an der Limitierung der gepunkteten Kurven deutlich erkennbar.

A 1.6 Detektion signifikanter Prozeßzustände und Prozeßwerte

Für die Umschaltung der mathematischen Modelle, der Varianten modellgestützter Meßverfahren und der Kennfelder sowie für die Generierung der Fuzzy-Modelle ist die Kenntnis und die exakte Detektion signifikanter Prozeßzustände und Kenngrößen unabdinglich. Im Ergebnis der Datenanalyse werden folgende signifikante Prozeßzustände und Prozeßwerte detektiert:

1. Klassifizierung schneller Druckabfall des Meßsignals,
2. Detektion des Ereignisses und des Zeitpunktes einer plötzlichen Druckentlastung (Druckstörung),
3. Detektion des Wertes Anfangsdruck der Druckstörung,
4. Detektion des Wertes Anfangsmassenfüllstand der Druckstörung,
5. Detektion des Wertes der maximalen Druck- und Massenfüllstandsänderungsgeschwindigkeit während der Transiente.

Diese Prozeßinformationen werden mit klassischen Algorithmen diagnostiziert, die durch klassische Logik- und Schaltoperationen gekennzeichnet sind und sich scharfer Werte und Kriterien bedienen. Als Eingangsgrößen und Referenzsignale für die Verfahren werden die direkt zur Verfügung stehenden Meßsignale (Meßgrößen) Druck und Massenfüllstand (Weitbereich) bzw. deren zeitliche Ableitungen Druck- und Massenfüllstandsänderungsgeschwindigkeit (Weitbereich) (p , dp/dt , h_{m_w} , dh_{m_w}/dt) im Behälter genutzt. Die Realisierung erfolgt mit dem Simulationsprogramm DynStar.

A 1.6.1 Detektion der Druckstörung

Für die Detektion der Druckstörung ist festzustellen, zu welchem Prozeßzeitpunkt der Druck im Behälter wesentlich abfällt. Dies wird häufig durch stochastischen Signalanteile erschwert. Es wird ein Algorithmus bereitgestellt, der zwischen einem bleibenden Druckabfall und einer kurzzeitigen stochastischen Meßstörung (Rauschen) unterscheidet. Für eine eindeutige und robuste Detektion werden Zwischen- und Hilfssignale generiert, von denen ausgewählte illustriert werden [Fens98]:

1. Druckabfall_p - Detektion des Druckabfalls anhand des Drucksignals
2. Druckabfall_dp - Detektion des Druckabfalls anhand des Signals Druckänderungsgeschwindigkeit
3. Druckabfall - Validieren des Druckabfalls mittels 1. und 2.

Die Zwischen- und Hilfssignale werden zum endgültigen binären Signal Druckstörung weiterverarbeitet:

⇒ 0 - keine Druckstörung

⇒ 1 - Druckstörung.

Das Signal Druckstörung kennzeichnet das Ereignis einer plötzlichen Druckentlastung und wird im folgenden für die Detektion weiterer Prozeßwerte genutzt. Dieses Signal findet notwendigerweise Eingang in die Generierung der Fuzzy-Algorithmen.

A 1.6.2 Detektion des Anfangsdruckes und Anfangsmassenfüllstandes zu Beginn einer Druckentlastung (Druckstörung)

Es erfolgt die Bestimmung des Anfangsdruckes und des Anfangsmassenfüllstandes zum Zeitpunkt des Beginns der Druckstörung. Hierbei finden sowohl die Zwischensignale als auch das Signal Druckstörung Verwendung.

1. $p_{\text{stör}_a}$ - Detektion des Anfangsdruckes bei Druckstörung
2. $hm_{w_stör_a}$ - Detektion des Anfangsmassenfüllstand bei Druckstörung

Im Bild A1-27 sind die Signale Druckstörung und Anfangsdruck der Druckstörung ($p_{\text{stör}_a}$) sowie die oben beschriebenen Zwischensignale beispielhaft für das Experiment 46 veranschaulicht. Der Anfangsdruck beim Auftreten einer Druckstörung wird mit dem Wert von 2,2 MPa richtig erkannt. Zu Beginn der Druckstörung, d. h. Abfall der Änderungsgeschwindigkeit, wird die jeweilige Größe mit dem Berechnungsalgorithmus fixiert. Dieser Wert wird über den gesamten Abblasezeitraum konstant gehalten und beim Schließen des Lecks wieder auf 0 zurückgesetzt. Wenn die Druckstörung beendet ist (Druckstörung = 0), ist der Wert für den Anfangsdruck damit wieder gleich dem aktuellen Druckmeßwert.

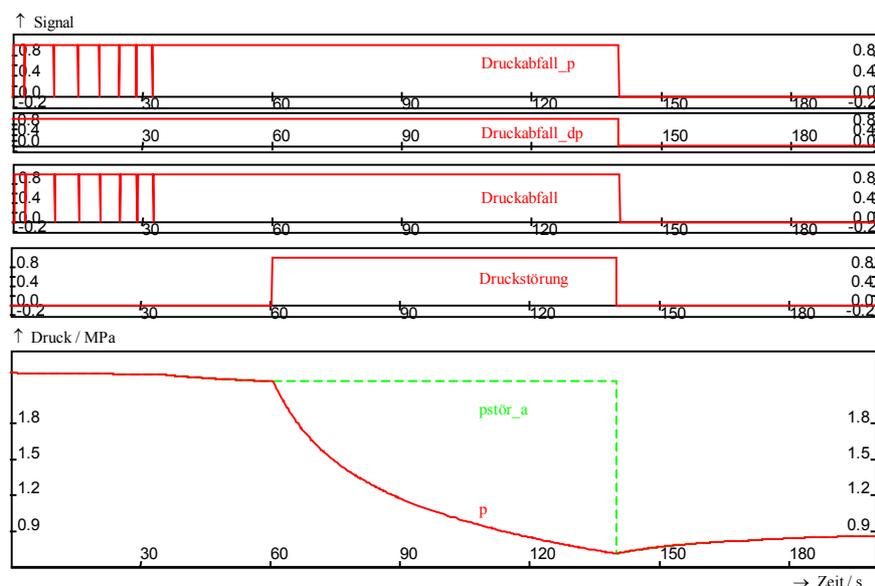


Bild A1-27: Bestimmung des Anfangsdruckes $p_{\text{stör}_a}$ zum Zeitpunkt der Druckentlastung für das Experiment 46

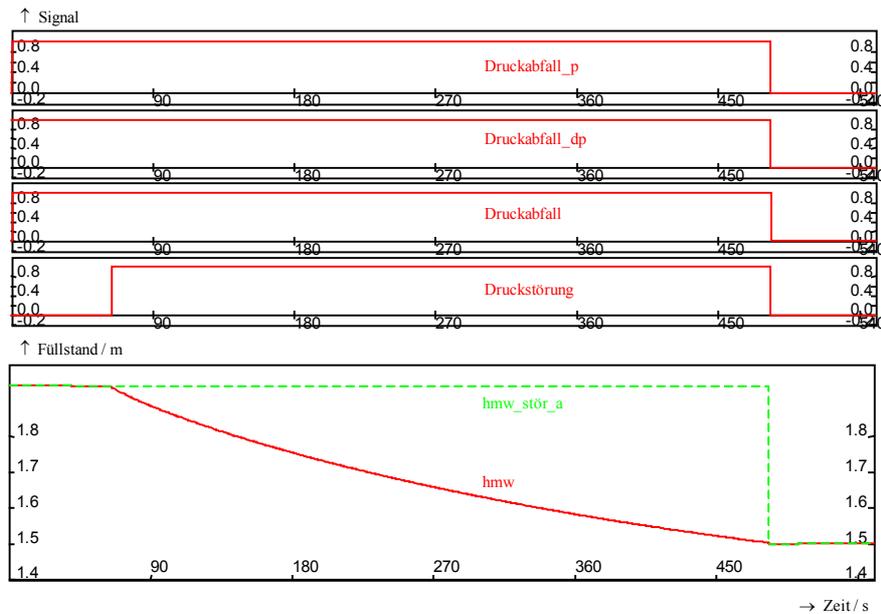


Bild A1-28: Bestimmung des Anfangsmassenfüllstandes $hm_{w_stör_a}$ im Fall einer Druckstörung für das Experiment 28

In der gleichen Art und Weise wie für den Anfangsdruck wird die Detektion des Anfangsmassenfüllstandes durchgeführt (Bild A1-28). Der Anfangsmassenfüllstand mit dem Wert von 1,95 m wird durch den entwickelten Algorithmus richtig erkannt. Mit diesen beiden Signalen sind zwei Eingangsgrößen für die Fuzzy-Algorithmen bestimmt.

A 1.6.3 Detektion der maximalen Druckänderungsgeschwindigkeit und Massenfüllstandsänderungsgeschwindigkeit

Es erfolgt die Detektion von Maximalwerten einzelner physikalischer Parameter während der Druckstörung, um u. a. eine Aussage über das Ausmaß der Störung abzuleiten. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden folgende Maximalwerte für den Bereich während der Drucktransiente (Druckstörung = 1) bestimmt:

⇒ Wert der maximalen Druckänderungsgeschwindigkeit $\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\max}$

⇒ Wert der maximalen Massenfüllstandsänderungsgeschwindigkeit $\left. \frac{dhm_w}{dt} \right|_{\max}$

Für die Generierung der wissensbasierten Algorithmen ist diese Information für die Realisierung von Umschaltprozessen und als Eingangsgröße erforderlich. Die Detektion der maximal erreichten Werte der Druck- und Massenfüllstandsänderungsgeschwindigkeit wird im Bild A1-29 für das Abblaseexperiment 46 veranschaulicht. Zu Beginn einer Transiente wird das Zwischensignal Anstieg verwendet, um einen starken negativen Anstieg der Änderungsgeschwindigkeiten festzustellen.

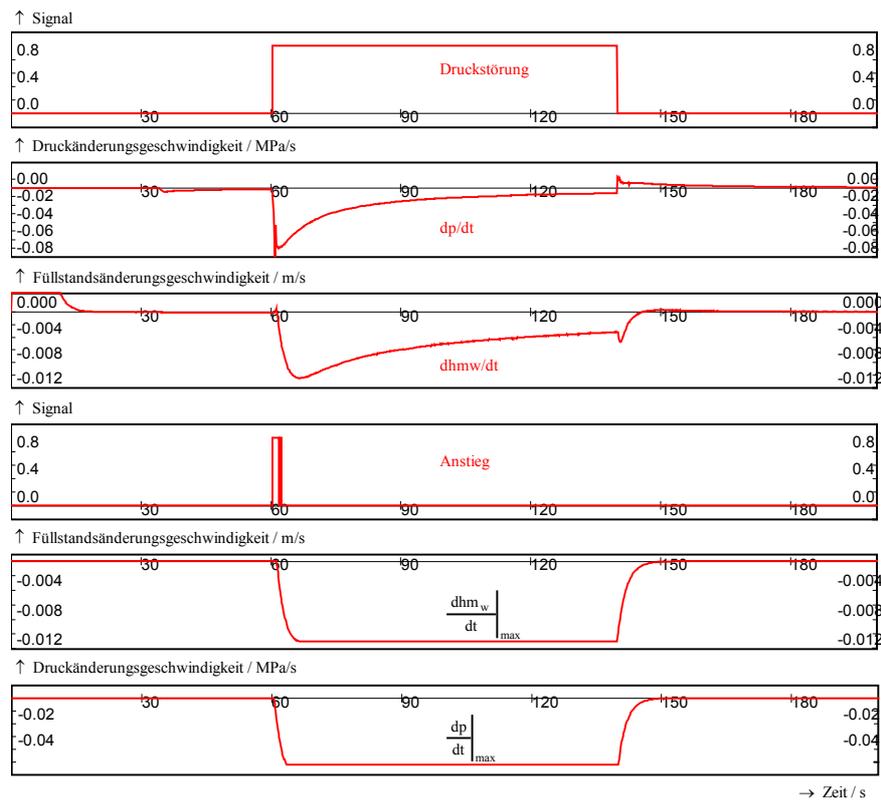


Bild A1-29: Bestimmung der maximalen Druck- und Massenfüllstandsänderungsgeschwindigkeit für das Experiment 46

Zu Beginn der Druckstörung wird die jeweilige Größe mit Hilfe des Berechnungsalgorithmus fixiert. Dieser Maximalwert wird über den gesamten Abblasezeitraum (Druckstörung = 1) konstant gehalten und beim Schließen des Lecks wieder auf Null zurückgesetzt.

Die entwickelten Algorithmen und Methoden zur Detektion von Prozeßzuständen und Prozeßkennwerten wurden für alle durchgeführten Experimente und Simulationsrechnungen (Variation des Anfangsdruckes und Anfangsmassenfüllstandes) erfolgreich getestet. Diese liefern zu den jeweiligen Anfangsbedingungen die erwarteten Werte. Die hier gewonnenen Prozeßinformationen sind notwendige Eingangsgrößen für die Generierung der Fuzzy-Algorithmen und die Umschaltung von Kennfeldern bzw. Modellen.

A 2 Berechnung eines nichtlinearen Normalformbeobachters für das nodale Gemischraummodell

Im folgenden wird das Entwurfsverfahren für nichtlineare Normalformbeobachter nach [Kell86-1, Kell86-2] verwendet. Zur nichtlinearen Beobachtungsaufgabe gehört als erstes der Nachweis der Beobachtbarkeit des Systems. Die Beobachtbarkeit definiert sich zu der Beobachtbarkeit im Großen [Kell86-1, Kell86-2]. Nachgewiesen wird die Beobachtbarkeit im Großen über die Existenz der Nichtlinearen Beobachtbarkeitsnormalform (NBKNF). Dies geschieht im Entwurfsverfahren mit dem ersten Schritt einer Transformation der Differentialgleichungen des Prozesses auf die NBKNF. Im zweiten Schritt wird die Nichtlineare Beobachternormalform (NBNF) berechnet. Daraus wird der nichtlineare Beobachter in Originalkoordinaten bestimmt.

A 2.1 Beobachtbarkeitsanalyse - Berechnung der Nichtlinearen Beobachtbarkeitsnormalform (NBKNF)

In diesem Abschnitt wird die Beobachtbarkeit des Prozesses (Druckbehälter mit siedendem Medium), beschrieben durch das nichtlineare Differentialgleichungssystem (Nodales Gemischraummodell mit zwei Zonen Kapitel 4), über die Existenz der NBKNF nachgewiesen [Fens97-1].

Definition der Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen:

$$\begin{aligned}
 \frac{dp}{dt} &\hat{=} u_1 \\
 hm_1 &\hat{=} x_1 \\
 hm_2 &\hat{=} x_2 \\
 \dot{Q}_1 &\hat{=} u_2 \\
 \dot{Q}_2 &\hat{=} u_3
 \end{aligned} \tag{A2.1}$$

Formulierung der nichtlinearen Beobachtungsaufgabe:

Die nichtlinearen Zustandsgleichungen ergeben sich nach Abschnitt 4.1.1 zu:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1'' - k_1 \cdot x_1 - \underbrace{(2k_2 + k_3)}_{k_a} \cdot x_1 \cdot u_1 + \underbrace{k_2 \cdot 2z_1}_{k_b} \cdot u_1 - k_4 \cdot u_2 \\ -w_1'' + k_1 \cdot x_1 + \underbrace{(k_6 + k_7 + k_2)}_{k_c} \cdot x_1 \cdot u_1 - \underbrace{k_2 \cdot 2z_1}_{k_b} \cdot u_1 + \\ -k_8 \cdot x_2 \cdot u_1 - k_5 \cdot u_3 + \underbrace{(k_4 - k_5)}_{k_d} \cdot u_2 \end{bmatrix} \tag{A2.2}$$

in Form des Zustandsdifferentialgleichungssystems und

$$y = x_2 \quad (\text{A2.3})$$

als Meßgleichung

$$\begin{aligned} & -\infty \leq u_1 \leq \infty \\ \text{mit } & 0 < x_1 \leq z_1 \\ & 0 < x_2 \leq h_{\text{Behälter}} \end{aligned} \quad (\text{A2.4})$$

Mit den in Gleichung (A2.2) definierten Abkürzungen ergeben sich die nachstehenden Gleichungen:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1'' - k_1 \cdot x_1 - k_a \cdot x_1 \cdot u_1 + k_b \cdot u_1 - k_4 \cdot u_2 \\ -w_1'' + k_1 \cdot x_1 + k_c \cdot x_1 \cdot u_1 - k_b \cdot u_1 + \\ -k_8 \cdot x_2 \cdot u_1 - k_5 \cdot u_3 + k_d \cdot u_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A2.5})$$

$$y = x_2$$

Für die Transformation wird die Abbildungsvorschrift (A2.6 und A2.7) erzeugt:

$$\begin{aligned} \bar{x}_2 = \text{Mh}(x, u, t) = \dot{x}_2 = \\ -w_1'' + k_1 \cdot x_1 + k_c \cdot x_1 \cdot u_1 - k_b \cdot u_1 - k_8 \cdot x_2 \cdot u_1 - k_5 \cdot u_3 + k_d \cdot u_2 \end{aligned} \quad (\text{A2.6})$$

$$\bar{x}_1 = h(x, u, t) = x_2 \quad (\text{A2.7})$$

Die inverse Abbildung dazu lautet:

$$x_2 = \bar{x}_1 = y \quad (\text{A2.8})$$

$$x_1 = \frac{\bar{x}_2 + w_1'' + k_b \cdot u_1 + k_8 \cdot \bar{x}_1 \cdot u_1 + k_5 \cdot u_3 - k_d \cdot u_2}{k_1 + k_c \cdot u_1} \quad (\text{A2.9})$$

Für die Berechnung der NBKNF werden die zeitlichen Ableitungen (A2.10), (A2.11) der Gleichungen (A2.8), (A2.9) gebildet. Dabei werden u_2, u_3 als zeitlich nicht abzuleitende Eingangsgrößen betrachtet.

$$\dot{\bar{x}}_1 = \dot{x}_2 = \bar{x}_2 \quad (\text{A2.10})$$

$$\begin{aligned}
\dot{\bar{x}}_2 = & \left(-k_1^2 - k_c \cdot u_1 \cdot k_1 - k_1 \cdot k_a \cdot u_1 - k_c \cdot u_1^2 \cdot k_a - k_8 \cdot u_1 \cdot k_1 - k_8 \cdot u_1^2 \cdot k_c + k_c \cdot \dot{u}_1 \right) \cdot \\
& \cdot \left(\frac{\bar{x}_2 + w_1'' + k_b \cdot u_1 + k_8 \cdot \bar{x}_1 \cdot u_1 + k_5 \cdot u_3 - k_d \cdot u_2}{k_1 + k_c \cdot u_1} \right) + \\
& + (k_8^2 \cdot u_1^2 - k_8 \cdot \dot{u}_1) \cdot \bar{x}_1 + \\
& + k_1 \cdot w_1 + (k_c \cdot w_1 + k_1 \cdot k_b + k_8 \cdot w_1) \cdot u_1 + (k_c \cdot k_b + k_8 \cdot k_b) \cdot u_1^2 - k_b \cdot \dot{u}_1 - k_1 \cdot k_4 \cdot u_2 + \\
& + (k_c \cdot k_4 - k_8 \cdot k_d) \cdot u_1 \cdot u_2 + k_8 \cdot k_5 \cdot u_1 \cdot u_3
\end{aligned} \tag{A2.11}$$

Es werden folgende Abkürzungen zur Übersichtlichkeit eingeführt:

$$\begin{aligned}
A = & -k_1^2 - k_c \cdot u_1 \cdot k_1 - k_1 \cdot k_a \cdot u_1 - k_c \cdot u_1^2 \cdot k_a - k_8 \cdot u_1 \cdot k_1 - k_8 \cdot u_1^2 \cdot k_c + k_c \cdot \dot{u}_1 \\
A_{\text{red}} = & -k_1^2 - k_c \cdot u_1 \cdot k_1 - k_1 \cdot k_a \cdot u_1 - k_c \cdot u_1^2 \cdot k_a - k_8 \cdot u_1 \cdot k_1 - k_8 \cdot u_1^2 \cdot k_c \\
B = & w_1'' + k_b \cdot u_1 + k_8 \cdot \bar{x}_1 \cdot u_1 + k_5 \cdot u_3 - k_d \cdot u_2 \\
u_a = & k_1 + k_c \cdot u_1 \\
C = & k_8^2 \cdot u_1^2 - k_8 \cdot \dot{u}_1 \\
D = & k_1 \cdot w_1 + (k_c \cdot w_1 + k_1 \cdot k_b + k_8 \cdot w_1) \cdot u_1 + (k_c \cdot k_b + k_8 \cdot k_b) \cdot u_1^2 - k_b \cdot \dot{u}_1 - k_1 \cdot k_4 \cdot u_2 + \\
& + (k_c \cdot k_4 - k_8 \cdot k_d) \cdot u_1 \cdot u_2 + k_8 \cdot k_5 \cdot u_1 \cdot u_3 \\
D_{\text{red}} = & k_1 \cdot w_1 + (k_c \cdot w_1 + k_1 \cdot k_b + k_8 \cdot w_1) \cdot u_1 + (k_c \cdot k_b + k_8 \cdot k_b) \cdot u_1^2 - k_1 \cdot k_4 \cdot u_2 + \\
& + (k_c \cdot k_4 - k_8 \cdot k_d) \cdot u_1 \cdot u_2 + k_8 \cdot k_5 \cdot u_1 \cdot u_3
\end{aligned} \tag{A2.12}$$

Daraus ergibt sich:

$$\dot{\bar{x}}_2 = \frac{A}{u_a} \cdot \bar{x}_2 + \frac{A \cdot B}{u_a} + C \bar{x}_1 + D \tag{A2.13}$$

Nach dem Einsetzen in den Systemvektor ergibt sich die NBKNF als Transformation für das Differentialgleichungssystem 2. Ordnung zu [Fens97-1]:

$$\dot{\bar{\mathbf{x}}} = \begin{bmatrix} \bar{x}_2 \\ \frac{A}{u_a} \cdot \bar{x}_2 + \frac{A \cdot B}{u_a} + C \bar{x}_1 + D \end{bmatrix} \tag{A2.14}$$

Da für die Zustandsgrößen und Eingangsgrößen alle Werte im physikalisch sinnvollen Bereich in die Gleichung (A2.14) einsetzbar sind, d. h. die Bahnkurve den betrachteten Bereich nicht verläßt, ist die Beobachtbarkeit im Großen gewährleistet.

A 2.2 Berechnung der Nichtlinearen Beobachternormalform (NBNF) 2. Ordnung

In diesem Abschnitt wird die Berechnung der NBNF für den Druckbehälter für das nodale Gemischraummodell mit zwei Zonen beschrieben [Fens97-1]. Die nichtlineare Beobachternormalform lautet für ein System 2. Ordnung [Kell86-2]:

$$\dot{\underline{x}}^* = \begin{bmatrix} -a_0(y, u, t) \\ x_1^* - a_1(y, u, t) \end{bmatrix} \quad (\text{A2.15})$$

$$x_2^* = x_2 = c(y)$$

Auf diese muß das System im zweiten Schritt aus der NBKNF transformiert werden. Dazu müssen die drei unbekannt Funktionen $c(y)$, $a_0(y, u, t)$, $a_1(y, u, t)$ aus dem Vergleich mit dem letzten NBKNF-Systemvektor bestimmt werden.

$$-\bar{a} = K_2 \cdot \bar{x}_2^2 + K_1 \cdot \bar{x}_2 + K_0 \quad (\text{A2.16})$$

Der Koeffizientenvergleich ergibt die Werte:

$$\begin{aligned} K_2 &= 0 \\ K_1 &= \frac{A}{u_a} \\ K_0 &= \frac{A \cdot B}{u_a} + C \cdot \bar{x}_1 + D \end{aligned} \quad (\text{A2.17})$$

Die Bestimmung der drei Funktionen ergibt nach Durchführung der Integration folgende Gleichungen:

$$\begin{aligned} \frac{c_{yy}}{c_y} &= 0 \\ c_y &= C_1 \\ c(y) &= C_1 \cdot y + C_2 \end{aligned} \quad (\text{A2.18})$$

$$a_{1y} = \frac{A}{u_a} \cdot c_y \quad (\text{A2.19})$$

$$a_1 = \frac{A}{u_a} \cdot y \cdot c_y + C_3(u_1) \quad (\text{A2.20})$$

$$\mathbf{a}_0 = \left(\frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}}{u_a} + \mathbf{C} \cdot \bar{x}_1 + \mathbf{D} \right) \cdot \mathbf{c}_y - (\mathbf{a}_{1_u})^T \cdot \dot{\mathbf{u}} \quad (\text{A2.21})$$

$$\mathbf{a}_0 = \left(\frac{A_{\text{red}} \cdot \mathbf{B}}{u_a} + D_{\text{red}} + k_8^2 \cdot u_1^2 \cdot y \right) \cdot \mathbf{c}_y + \left(\frac{k_c \cdot \mathbf{B}}{u_a} - k_b - k_8 \cdot y \right) \cdot \dot{u}_1 - \frac{dC_3}{du_1} \cdot \dot{u}_1 \quad (\text{A2.22})$$

Die Konstanten C_1, C_2, C_3 werden wie folgt gewählt:

$$\begin{aligned} C_1 &= 1 \\ C_2 &= 0 \\ C_3 &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A2.23})$$

Für die drei Funktionen folgt dann:

$$\mathbf{a}_0 = \left(\frac{A_{\text{red}} \cdot \mathbf{B}}{u_a} + D_{\text{red}} + k_8^2 \cdot u_1^2 \cdot y \right) + \left(\frac{k_c \cdot \mathbf{B}}{u_a} - k_b - k_8 \cdot y \right) \cdot \dot{u}_1 \quad (\text{A2.24})$$

$$\mathbf{a}_1 = \frac{\mathbf{A}}{u_a} \cdot y \quad (\text{A2.25})$$

$$\mathbf{c}(y) = y \quad (\text{A2.26})$$

Durch Einsetzen in (A2.1) berechnet sich die NBNF:

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}}^* &= \left[\begin{array}{c} \left(\frac{A_{\text{red}} \cdot \mathbf{B}}{u_a} + D_{\text{red}} + k_8^2 \cdot u_1^2 \cdot y \right) + \left(\frac{k_c \cdot \mathbf{B}}{u_a} - k_b - k_8 \cdot y \right) \cdot \dot{u}_1 \\ x_1^* \end{array} \right] \\ x_2^* &= x_2 \end{aligned} \quad (\text{A2.27})$$

Für die Bestimmung des Beobachters werden die nichtlinearen Transformationen berechnet:

$$\mathbf{v}(\underline{x}, t, u, \dot{u}) = \left[\begin{array}{c} -w_1'' + k_1 \cdot x_1 + k_c \cdot x_1 \cdot u_1 - k_b \cdot u_1 - k_8 \cdot x_2 \cdot u_1 - k_5 \cdot u_3 + k_d \cdot u_2 + \frac{\mathbf{A}}{u_a} x_2 \\ x_2 \end{array} \right] = \underline{x}^* \quad (\text{A2.28})$$

Die Bildung der inversen nichtlinearen Transformation ergibt:

$$\tilde{\mathbf{v}}(\underline{x}^*, t, u, \dot{u}) = \left[\begin{array}{c} \left(x_1^* + w_1 + k_b \cdot u_1 + k_8 \cdot u_1 \cdot x_2^* + k_5 \cdot u_3 - k_d \cdot u_2 - \frac{\mathbf{A}}{u_a} x_2^* \right) \cdot \frac{1}{u_a} \\ x_2^* \end{array} \right] = \underline{x} \quad (\text{A2.29})$$

Die Berechnung der Beobachterkomponenten in Originalkoordinaten erfolgt nach dem Schema:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \tilde{v}_1}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{v}_1}{\partial x_1^*} \cdot Fk_1 + \frac{\partial \tilde{v}_1}{\partial x_2^*} \cdot Fk_2 + \frac{\partial \tilde{v}_1}{\partial u_1} \cdot \dot{u}_1 \\ \frac{\partial \tilde{v}_2}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{v}_2}{\partial x_1^*} \cdot Fk_1 + \frac{\partial \tilde{v}_2}{\partial x_2^*} \cdot Fk_2 + \frac{\partial \tilde{v}_2}{\partial u_1} \cdot \dot{u}_1 \end{bmatrix} \quad (\text{A2.30})$$

mit

$$\underline{Fk} = \underline{F} \cdot \underline{v}(x, u, t) - \underline{a}(y, u, t) + \underline{k} \cdot c \cdot (y) \quad (\text{A2.31})$$

Die Betrachtung des Systems erfolgt zeitinvariant, d. h. die Ableitungen nach ∂t (der erste Term) fallen weg.

Die Verstärkungsmatrix wird zu $\underline{k} = \underline{g}$ definiert. Damit gilt:

$$\underline{F} \cdot \underline{v} = \begin{bmatrix} -g_0 \cdot v_2 \\ v_1 - g_1 \cdot v_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A2.32})$$

$$\begin{aligned} Fk_1 &= -g_0 \cdot \hat{x}_2 - a_0(y, u, t) + g_0 \cdot y \\ Fk_2 &= (v_1 - g_1 \cdot v_2) - a_1(y, u, t) + g_1 \cdot y \end{aligned} \quad (\text{A2.33})$$

Die Ableitungen in (A2.16) ergeben sich zu:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{v}_1}{\partial x_1^*} &= \frac{1}{u_a} \\ \frac{\partial \tilde{v}_1}{\partial x_2^*} &= \frac{k_8 \cdot u_1}{u_a} - \frac{A}{u_a^2} \\ \frac{\partial \tilde{v}_1}{\partial u_1} &= \frac{\partial}{\partial u_1} \cdot \frac{1}{u_a} \cdot \left(x_1^* + w_1 + k_b \cdot u_1 + k_8 \cdot u_1 \cdot x_2^* - k_5 \cdot u_3 - k_d \cdot u_2 - \frac{A}{u_a} \cdot x_2^* \right) \\ \frac{\partial \tilde{v}_2}{\partial x_1^*} &= 0 \\ \frac{\partial \tilde{v}_2}{\partial x_2^*} &= 1 \\ \frac{\partial \tilde{v}_2}{\partial u_1} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A2.34})$$

Nach Einsetzen und Umstellen der Gleichungen ergeben sich die Beobachtergleichungen in Originalkoordinaten für die zweite und erste Zone entsprechend der Gleichungen (A2.35) und (A2.36) [Fens97-1]:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_2 = & \underbrace{-w_1'' + k_1 \cdot \hat{x}_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot \hat{x}_1 \cdot u_1 - k_2 \cdot 2z_1 \cdot u_1 +}_{\text{Streckenmodell}} \\ & \underbrace{-k_8 \cdot \hat{x}_2 \cdot u_1 - k_5 \cdot u_3 + (k_4 - k_5) \cdot u_2}_{\text{Korrekturterm}} + \\ & \underbrace{\left(k_1 + (2k_2 + k_3) \cdot u_1 + \frac{k_8 \cdot k_1 \cdot u_1}{k_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot u_1} \right) \cdot (y - \hat{x}_2) + g_1 \cdot (y - \hat{x}_2)}_{\text{Korrekturterm}} \end{aligned} \quad (\text{A2.35})$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 = & \underbrace{w_1'' - k_1 \cdot \hat{x}_1 + k_2 \cdot 2z_1 \cdot u_1 - k_4 \cdot u_2 - (2k_2 + k_3) \cdot \hat{x}_1 \cdot u_1 +}_{\text{Streckmodell}} \\ & + \frac{k_1 + k_8 \cdot u_1 \cdot (k_5 \cdot (u_2 + u_3) + w_1'' + k_2 \cdot 2z_1 \cdot u_1 - k_4 \cdot u_2)}{k_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot u_1} + \\ & - \left(\frac{k_5 \cdot (u_2 + u_3) + w_1'' + k_2 \cdot 2z_1 \cdot u_1 - k_4 \cdot u_2}{k_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot u_1} \right) \cdot \left(k_1 + (2k_2 + k_3) \cdot u_1 + \frac{k_8 \cdot k_1 \cdot u_1 + k_8 \cdot u_1^2 \cdot (k_6 + k_7 + k_2)^2}{k_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot u_1} \right) + \\ & + \left(\frac{-k_5 \cdot (u_2 + u_3) - w_1'' - k_2 \cdot 2z_1 \cdot u_1 + k_4 \cdot u_2}{k_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot u_1} \right) \cdot \left(k_8 \cdot u_1 - k_1 - (2k_2 + k_3) \cdot u_1 - \frac{k_8 \cdot k_1 \cdot u_1}{k_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot u_1} \right) + \\ & + \left(\frac{(k_6 + k_7 + k_2) \cdot \hat{x}_1 + k_2 \cdot 2z_1 - (2k_2 + k_3) \cdot \hat{x}_2}{k_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot u_1} - \frac{k_1}{(k_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot u_1)^2} \right) \cdot \dot{u}_1 + \\ & + \left(1 - \frac{k_1}{k_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot u_1} \right) \cdot k_8 \cdot u_1 \cdot \hat{x}_1 + \\ & + \frac{k_8^2 \cdot u_1^2}{k_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot u_1} \cdot (y - \hat{x}_2) + \\ & - \left(k_8 \cdot u_1 - k_1 - (2k_2 + k_3) \cdot u_1 - \frac{k_8 \cdot k_1 \cdot u_1}{k_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot u_1} \right) \cdot \left(k_1 + (2k_2 + k_3) \cdot u_1 + \frac{k_8 \cdot k_1 \cdot u_1}{k_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot u_1} \right) \cdot (y - \hat{x}_2) + \\ & + \frac{1}{k_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot u_1} \cdot \left(g_0 + \left(k_8 \cdot u_1 - k_1 - (2k_2 + k_3) \cdot u_1 - \frac{k_8 \cdot k_1 \cdot u_1}{k_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot u_1} \right) \cdot g_1 \right) \cdot (y - \hat{x}_2) + \\ & - \frac{k_8 \cdot u_1}{k_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot u_1} \cdot \left(\left(k_1 + (2k_2 + k_3) \cdot u_1 + \frac{k_8 \cdot k_1 \cdot u_1 + k_8 \cdot u_1^2 \cdot (k_6 + k_7 + k_2)^2}{k_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot u_1} \right) \cdot y + \right. \\ & \left. + \left(k_8 \cdot u_1 - k_1 - (2k_2 + k_3) \cdot u_1 - \frac{k_8 \cdot k_1 \cdot u_1}{k_1 + (k_6 + k_7 + k_2) \cdot u_1} \right) \cdot \hat{x}_2 \right) \end{aligned} \quad (\text{A2.36})$$

Wie für die Zustandsdifferentialgleichung der ersten Zone ersichtlich wird, ist eine vollständige Trennung in den nichtlinearen und linearen Systemanteil, d. h. eine Separation der linearen Fehlergleichung nicht möglich. Der Korrekturterm, d. h. die Rückführung mit der linearen Fehlerdifferentialgleichung verschwindet für $y = \hat{x}_2$ nicht, was aber eine wichtige

Forderung für Normalformbeobachter ist. Dies ist nur bei der Gleichung (A2.21) erreicht, der ohnehin meßbaren Zustandsgröße. Eine Kompensation der Abhängigkeiten von den zeitlichen Ableitungen der Eingangsgröße wurde auch nicht realisierbar, so daß noch Terme in Abhängigkeit der Eingangsgröße auftreten.

A 3 Programmlistings zur Berechnung der Füllstände mittels DynStar

Es werden einige ausgewählte Programmlistings des Softwaresystems „DynStar“ [DynS00] sowie der dazugehörigen Fuzzy-Shell dargestellt, die zur Berechnung der erstellten Modelle in Kapitel 3 bis 6 verwendet wurden.

A 3.1 Programm zur Berechnung der Füllstände für das nodale Gemischraummodell mit dem hybriden nichtlinearen PI-Arbeitspunkt-Beobachter

```

*****
START
*****
***  Parametervorgaben  ***
*****

VER  1.0  z11.0
VER  1.0  A 6.0821E-03
VER  1.0  Hue 1.0      ;Höhe der unteren Einbindung
ENDSTART
*
SUM  Zeit 0.0  t      ;Parameter Zeit auf t setzen
*
*****
***  Einlesen der Prozeßdaten  ***
*****
POLY t  p          're_b12mm\hanf12\anfdr24\p24m____.xy'
POLY t  dpdt       're_b12mm\hanf12\anfdr24\dpdt24m_.xy'
POLY t  hg         're_b12mm\hanf12\anfdr24\hgber24_.xy'
POLY t  hmw        're_b12mm\hanf12\anfdr24\hmgro24m.xy'
POLY t  hm1_ath    're_b12mm\hanf12\anfdr24\hmwek124m.xy'
POLY t  hm2_ath    're_b12mm\hanf12\anfdr24\hmwek224m.xy'
...
*POLY  t  p          'exp_5mm\p22h170\22170p.xy'
*POLY  t  dpdt       'exp_5mm\p22h170\22170dp.xy'
*POLY  t  hg         'exp_5mm\p22h170\22170hg.xy'
*POLY  t  hmw        'exp_5mm\p22h170\22170gr.xy'
*****
***  Absolutwerte Füllstände berechnen  ***
*****
SUM  hm1_0  hm1_athHm1_ath
SUM  hm2_0  hm2_athHm2_ath
VER  Hm2_athmeßx2  1.0
SUM  Hm2_athHue  Hm2_ath_abs

```

```
*****
***  Eingangsgrößen Fuzzy Modell  ***
*****
```

```
VER p   pf1   1.0
VER dpdt dpf1 1.0
VER p   pf2   1.0
VER dpdt dpf2 1.0
```

```
*****
***  Integration Gradient wärmestrom Zone 1 und 2 (Ausgangsgröße FM) ***
*****
```

```
INT dq1f  Q1f 1.0 0.
INT dq2f  Q2f 1.0 0.
```

```
*****
***  Realisierung des Fuzzy-Modells für den wärmestrom Zone 1 und 2  ***
*****
```

```
FCRUN 'FC_Q1'
VER Q1f QP1_mw 1.0E-06;Umrechnung in w
FCRUN 'FC_Q2'
VER Q2f QP2_mw 1.0E-06
```

```
*****
***  Berechnung Dampfblasengeschwindigkeit ***
*****
```

```
MUL p 0.0039 801
SUM 0.85 -801 802 ;Berechnung der Dampfblasengeschwindigkeit
VER Hm1_b 803 1.0 ;als Funktion des aktuellen Druckes und
* ;des aktuellen Dampfgehaltes Hm1_b
DIV 802 803 w2
```

```
***Berechnung der Stoffdaten in Abhängigkeit von Druck und Siedetemperatur***
```

```
VER p p_bar 10.0 ;Umrechnung in bar
Ts_p p_bar Ts
*
* Dichte_1= f(Ts)= f(p)
v1_T Ts v1
REZ v1 rho1
*
* Dichte_2= f(Ts)= f(p)
v2_T Ts v2
REZ v2 rho2
```

```

*
* Enthalpie_1= f(Ts)= f(p)
h1_T Ts h1x
VER h1x h1 0.001 ;Umrechnung in MJ/kg
*
* Enthalpie_2= f(Ts)= f(p)
h2_T Ts h2x
VER h2x h2 0.001 ;Umrechnung in MJ/kg
*
* Verdampfungsenthalpie= f(Ts)= f(p)
*r_T Ts rx
*VER rx r 0.001 ;Umrechnung in MJ/kg
INV h1 999
SUM h2 999 r
*

*****
*** Berechnung der druckabhängigen Stoffdaten für pp1 ***
*****

* Siedetemperatur= f(p) [p1]
SUM p 0.01 pp1
VER pp1 p_barpp1 10.0 ;Umrechnung in bar
Ts_p p_barpp1 Tsp1
*
* Dichte_1= f(Ts)= f(p) [p1]
v1_T Tsp1 v1p1
REZ v1p1 rho1p1
*
* Dichte_2= f(Ts)= f(p) [p1]
v2_T Tsp1 v2p1
REZ v2p1 rho2p1
*
* Enthalpie_1= f(Ts)= f(p) [p1]
h1_T Tsp1 h1xp1
VER h1xp1 h1p1 0.001 ;Umrechnung in MJ/kg
*
* Enthalpie_2= f(Ts)= f(p) [p1]
h2_T Tsp1 h2xp1
VER h2xp1 h2p1 0.001 ;Umrechnung in MJ/kg
*

```

```

*****
*** Berechnung der druckabhängigen Stoffdaten für pmin ***
*****

* Siedetemperatur= f(p)          [min]
SUM p -0.01 pmin
VER pmin p_barmin 10.0          ;Umrechnung inbar
Ts_p p_barmin Tsmin
*

* Dichte_1= f(Ts)= f(p)         [min]
v1_T Tsmin v1min
REZ v1min rho1min
*

* Dichte_2= f(Ts)= f(p)         [min]
v2_T Tsmin v2min
REZ v2min rho2min
*

* Enthalpie_1= f(Ts)= f(p)      [min]
h1_T Tsmin h1xmin
VER h1xmin h1min 0.001          ;Umrechnung inMJ/kg
*

* Enthalpie_2= f(Ts)= f(p)      [min]
h2_T Tsmin h2xmin
VER h2xmin h2min 0.001          ;Umrechnung inMJ/kg
*

*****
*** Berechnung der partiellen Ableitungen der Stoffdaten nach dem Druck***
*****

INV pmin 900
SUM pp1 900 del_p              ;Berechnung delta_p
*

INV rho1min901
SUM rho1p1 901 del_rho1
DIV del_rho1 del_p drho1       ;Berechnung delta_rho1/delta_p
*

INV rho2min902
SUM rho2p1 902 del_rho2
DIV del_rho2 del_p drho2       ;Berechnung delta_rho2/delta_p
*

INV h1min 903
SUM h1p1 903 del_h1
DIV del_h1 del_p dh1           ;Berechnung delta_h1/delta_p
*

INV h2min 904

```

```

SUM h2p1 904 del_h2
DIV del_h2 del_p dh2 ;Berechnung delta_h2/delta_p
*
*****
*** Berechnung der Koeffizienten K11 bis K8 ***
*****
DIV w2 z1 K11
*
DIV drho2 rho2 K2
*
MUL rho1 dh1 101
NOT 101 klammer
DIV klammerr bruch
DIV bruch rho2 K3
*
MUL rho2 A r 102
REZ 102 K4
*
MUL rho1 A r 103
REZ 103 K5
*
INV v1 104
SUM v2 104 105
MUL 105 bruch K6
*
DIV drho2 rho2 107
DIV drho1 rho1 108
SUM 107 -108 K7
*
DIV drho1 rho1 109
DIV bruch rho1 110
SUM 109 110 K8
*
*****
*** Berechnung der Terme DGL Zone 1***
*****
VER w2 STI1 1.0
MUL K11 Hm1_b 201
INV 201 STI2
VER K2 202 2.0
SUM 202 K3 203
MUL 203 Hm1_b dpdt 204
INV 204 STI3

```

```

MUL K2 2. z1 dpdt STI4
MUL K4 QP1_mw 205
INV 205 STI5
SUM STI1 STI2 STI3 STI4 STI5 kor_1 kor_3 210
*
*****
*** Berechnung der Terme DGL Zone 2 ***
*****
VER w2 STJ1 -1.0
SUM K6 K7 211
MUL 211 Hm1_b dpdt STJ2
MUL K11 Hm1_b STJ3
MUL K2 Hm1_b dpdt STJ4
MUL K8 Hm2_ath dpdt 212 ;Einsetzen der Meßgröße in die Beobachtergleichung
INV 212 STJ5
MUL K2 2. z1 dpdt 213
INV 213 STJ6
INV K5 214
SUM K4 214 215
MUL 215 QP1_mw STJ7
MUL K5 QP2_mw 216
INV 216 STJ8
SUM STJ1 STJ2 STJ3 STJ4 STJ5 STJ6 STJ7 STJ8 kor_2 kor_4 220

*****
*** Berechnung Füllstand Zone 1 und 2 ***
*****
INT 210 Hm1_b 1.0 hm1_0
INT 220 Hm2_b 1.0 hm2_0
SUM Hm2_b Hue Hm2_b_abs ;Absolutwert im Behälter

*****
*** Umsetzung des Beobachters ***
*****
VER Hm2_b meßx2b 1.0
INV meßx2b mex2b ;Meßgröße Modell
SUM meßx2 mex2b ex ;Rekonstruktionsfehler
INT ex iex 1.0
*VER ex kor_1 0.0 ;ohne Rückkopplung
*VER ex kor_2 0.0
*VER iex kor_3 0.0 ;ohne Rückkopplung
*VER iex kor_4 0.0
*

```

```

VER ex kor_1 -10.0 ;PI-Beobachter
VER ex kor_2 10.0
VER iex kor_3 -10. ;PI-Beobachter
VER iex kor_4 10.
*
*****
*** AusgabeBildschirm ***
*****
*** Prozeßdaten
WIN 20 55 310 255
BSG p p_b 0.0 2.5
WIN 330 55 620 255
BSG dpdt dpdt -0.015 0.005
WIN 20 275 310 475
BSG hm1_ath hm2_ath-0.2 0.15
WIN 330 275 620 475
BSG Hm1_ath Hm2_ath0.8 1.15 1.0 1.35
*
*** Waermestroeme
*BSG t Q1f 0.360. -2000. 10000. dt o
*BSG QP1 QP1 -2000. 12000.
*ADDLINE t Q2f 0.360. -2000. 10000. 11
*ADDLINE t Q1 0.360. -2000. 10000. 13
*ADDLINE t Q2 0.360. -2000. 10000. 13
*
*** Füllstände
WIN 20 30 620 230
BSG t hm1_ath 50.0 160.0 -0.5 0.15 dt o
ADDLINEt Hm1_ath 50.0 160.0 0.5 1.15 14
ADDLINEt Hm1_b 50.0 160.0 0.5 1.15 12
WIN 20 235 620 435
BSG t hm2_ath 50.0 160.0 -0.3 0.3 dt o
ADDLINEt Hm2_ath_abs 50.0 160.0 0.9 1.5 14
ADDLINEt Hm2_b_abs 50.0 160.0 0.9 1.5 12

```

A 3.2 Programm zur scharfen Umschaltung der Kennfelder für die Berechnung der Wärmeströme Zone 1 und 2, kleine und große Blende für das nodale Gemischraummodell

```

*****
*** Parameterbelegung ***
*****

SUM Zeit    0.0 t
VER dp dpg  1.0
VER dp dpdt 1.0
VER pp p    1.0
*****
***   EINLESEN PROZEßDATEN   ***
*****

POLY t pp   're_b15mm\hanf16\anfdru24\p24____.xy'
POLY t dp   're_b15mm\hanf16\anfdru24\dpdt24__.xy'
POLY t Q2m  're_b15mm\hanf16\anfdru24\q224____.xy'
*****
***ERKENNEN DRUCKSTOERUNG UND ANFANGSDRUCK DER STOERUNG***
*****

*** Definition intervall
VER dt intervall 25.0
*
*** Erkennen druckabfall_p
CMP p druckabfall_p p_k 1.0 0.0
*
*** Erkennen druckabfall_dp
CMP dp_dt druckabfall_dp 0.0 1.0 0.0
*
*** Erkennen Rauschanteil
FRB druckabfall_p bin_drab_p 0.1
BCOUNT bin_drab_p rate_p 1
FIR rate_p    rate_rp
TOT rate_rp   ratrp_tot intervall 0.0
SUM rate_rp  -ratrp_tot ratrp_sum
CMP ratrp_sum rausch_p  1.1  0.0 1.0
VER rausch_p  rauschen  1.0
*
*** validieren druckabfall
CMP rauschen druckabfall 1.0 druckabfall_p2 druckabfall_dp2

*
*** Erkennen und Validieren stoerung
CMP dp_dt    stoerung1 -0.001  1.0 0.0

```

```

CMP dp_dt      stoerung2 -0.006  1.0 0.0
CNT stoerung2 stoerung3  0.9    1.1 1.0
CMP stoerung3 stoerung4  1.1    0.0 1.0
CMP stoerung2 stoerung  stoerung1 stoerung4 stoerung1
CMP dp_dt stoerung3 0. stoerung3 0.0
CMP dp_dt stoerung4 0. stoerung4 0.0
*
*** Erkennen und validieren druckstoerung
AND stoerung druckabfall druckstoer
CMP rauschen druckstoer 0.0 druckstoer stoerung

*** p0_Variante1 Anfangsdruck wenn Druckabfall
CMP druckabfall p0_v1 1.0 p p0_v1
*
*** p0_Variante2 Anfangsdruck wenn Druckabfall und Stoerung
CMP druckstoer p0_v2 1.0 p p0_v2
*
*** Anfangshöhenstand bei Druckstörung
*CMP druckstoer h0_v2 1.0 c1 h0_v2
*
****Schieberegister für die Druckwerte
VER p_kk p_k  1.0
VER p  p_kk  1.0

VER druckabfall_dp1 druckabfall_dp2  1.0
VER druckabfall_dp druckabfall_dp1  1.0

VER druckabfall_p1 druckabfall_p2  1.0
VER druckabfall_p druckabfall_p1  1.0
*****
*** Detektion Maximum Druckaenderungsgeschwindigkeit ***
*****
****Schieberegister
VER dp_dt9 dp_dt10  1.0
VER dp_dt8 dp_dt9  1.0
VER dp_dt7 dp_dt8  1.0
VER dp_dt6 dp_dt7  1.0
VER dp_dt5 dp_dt6  1.0
VER dp_dt4 dp_dt5  1.0
VER dp_dt3 dp_dt4  1.0
VER dp_dt2 dp_dt3  1.0
VER dp_dt1 dp_dt2  1.0
VER dp_dt dp_dt1  1.0

```

***arithmetischer Mittelwert

SUM dp_dt1 dp_dt2 dp_dt3 dp_dt4 dp_dt5 dp_dt6 dp_dt7 dp_dt8 dp_dt9 dp_dt10
 dpsum

DIV dpsum 10. dpmit

***ERKENNEN Anstieg dp_dt

INV dp_dt mdp_dt

MFLOP mdp_dt anstieg1 dt

VER anstieg2 anstieg2 0.0

CMP druckstoer anstieg 1.0 anstieg2 anstieg1

CMP anstieg dpmax_neu 1.0 dpmax dp_dt

CMP dpmax_neu dpmax dpmax_a3 dpmax_neu dpmax_a3

VER dpmax_a2 dpmax_a3 1.0

VER dpmax_a1 dpmax_a2 1.0

VER dpmax_neu dpmax_a1 1.0

*** INPUT für die FUZZY-Modelle ***

VER dpg dpf 1.0

VER druckstoer Druckstörung 1.0

VER p0_v2 p0stoerf 1.0

INT dQ2fgroß Q2fgroß 1.0

INT dQ2fklein Q2fklein 1.0

FCRUN 'FCQ2klein'

FCRUN 'FCQ2groß'

*** Kennfeldumschaltung ***

CMP dpmax Kgtor -0.03 1.0 0.0

SUM 1. -Kgtor einsmKg

MUL Kgtor Q2fgroß Q2Kgh

MUL einsmKg Q2fklein Q2Kg1

SUM Q2Kgh Q2Kg1 Q2f

AUSGABE auf Bildschirm

WIN% 0 0 1000 600

BSG t Q2m 0.0 590.0 -2000.0 9000.0 dt 0

Addline t Q2f 0.0 590.0 -2000.0 9000.0 12

Addline t pp 0.0 590.0 0.0 2.5 12

ktr dpmax Q2f Q2fgroß Q2fklein p0stoerf druckstoer 1.0

A 3.3 Programm zur Berechnung des Gemischfüllstandes mit dem fuzzy-basierten Parallelmodell

```

*****
*** Parameterbelegung ***
*****

SUM Zeit 0.0 t
VER dp dpG 1.0
VER dp dpdt 1.0
VER ppp 1.0
DIV hg hmw divmc
*****
*** Einlesen der Prozeßdaten ***
*****
POLY t pp 'exp_5mm\p22h195\22195p.xy'
POLY t dp 'exp_5mm\p22h195\22195dp.xy'
POLY t hg 'p14h103\14103hg.xy'
POLY t hmw 'p14h103\14103gr.xy'

*****
*** ERKENNEN DRUCKSTOERUNG UND ANFANGSDRUCK DER STOERUNG ***
*****

*** Definition intervall
VER dtintervall 25.0
*
*** Erkennen druckabfall_p
CMP p druckabfall_p p_k 1.0 0.0
*
*** Erkennen druckabfall_dp
CMP dp_dt druckabfall_dp 0.0 1.0 0.0
*
*** Erkennen Rauschanteil
FRB druckabfall_p bin_drab_p 0.1
BCOUNT bin_drab_p rate_p 1
FIR rate_rp rate_rp
TOT rate_rp ratrp_tot intervall 0.0
SUM rate_rp -ratrp_tot ratrp_sum
CMP ratrp_sum rausch_p 1.1 0.0 1.0
VER rausch_p rauschen 1.0
*
*** Validieren druckabfall
CMP rauschen druckabfall 1.0 druckabfall_p2 druckabfall_dp2
*
*** Erkennen und validieren stoerung

```

```

CMP dp_dt      stoerung1  -0.001  1.0    0.0
CMP dp_dt      stoerung2  -0.006  1.0    0.0
CNT stoerung2  stoerung3   0.9    1.1    1.0
CMP stoerung3  stoerung4   1.1    0.0    1.0
CMP stoerung2  stoerung   stoerung1 stoerung4 stoerung1
CMP dp_dt      stoerung3 0. stoerung3 0.0
CMP dp_dt      stoerung4 0. stoerung4 0.0
*
*** Erkennen und Validieren druckstoerung
AND stoerung druckabfall druckstoer
CMP rauschen druckstoer 0.0 druckstoer stoerung

*** p0_Variante1 Anfangsdruck wenn Druckabfall
CMP druckabfall p0_v1 1.0 p p0_v1
*
*** p0_Variante2 Anfangsdruck wenn Druckabfall und Stoerung
CMP druckstoer p0_v2 1.0 p p0_v2
*
*** Anfangshöhenstand bei Druckstörung
CMP druckstoer h0_v2 1.0 hmw h0_v2

*
****Schieberegister für die werte
VER p_kk p_k 1.0
VER p p_kk 1.0

VER druckabfall_dp1 druckabfall_dp2 1.0
VER druckabfall_dp druckabfall_dp1 1.0

VER druckabfall_p1 druckabfall_p2 1.0
VER druckabfall_p druckabfall_p1 1.0

*****
*** Detektion Maximum Druckänderungsgeschwindigkeit ***
*****
****Schieberegister
VER dp_dt9 dp_dt10 1.0
VER dp_dt8 dp_dt9 1.0
VER dp_dt7 dp_dt8 1.0
VER dp_dt6 dp_dt7 1.0
VER dp_dt5 dp_dt6 1.0
VER dp_dt4 dp_dt5 1.0
VER dp_dt3 dp_dt4 1.0

```

```

VER dp_dt2    dp_dt3    1.0
VER dp_dt1    dp_dt2    1.0
VER dp_dt     dp_dt1    1.0
***arithmetischer Mittelwert
SUM dp_dt1    dp_dt2    dp_dt3 dp_dt4 dp_dt5 dp_dt6 dp_dt7 dp_dt8 dp_dt9
    dp_dt10dpsum
DIV dpsum 10. dpmit
***ERKENNEN Anstiegdp_dt
INV dpmit     mdpmit
MFLOP mdpmit  anstieg1 dt
VER anstieg2  anstieg2 0.0
CMP druckstoer anstieg 1.0 anstieg2 anstieg1
CMP anstieg   dpmax_neu 1.0 dpmax   dp_dt

*****
*** Schieberegister für dp_max ***
*****

CMP dpmax_neu dpmax1 dpmax_a10 dpmax_neu dpmax_a10
CMP druckstoer dpmax 1.0 0.0 dpmax1
VER dpmax_a9 dpmax_a10 1.0
VER dpmax_a8 dpmax_a9 1.0
VER dpmax_a7 dpmax_a8 1.0
VER dpmax_a6 dpmax_a7 1.0
VER dpmax_a5 dpmax_a6 1.0
VER dpmax_a4 dpmax_a5 1.0
VER dpmax_a3 dpmax_a4 1.0
VER dpmax_a2 dpmax_a3 1.0
VER dpmax_a1 dpmax_a2 1.0
VER dpmax_neu dpmax_a1 1.0

*****
*** INPUT für das FUZZY-Modell ***
*****

VER dpmax      dpmaxf      1.0
VER druckstoer Druckstörung 1.0
VER p0_v2      pstör_a      1.0
VER h0_v2      hmw_stör_a    1.0
*****
*** Realisierung Fuzzy-Modell ***
*****

FCRUN 'FC_hgKg'
```

```
*****
***  AUSGABE auf Bildschirm  ***
*****
```

```
WIN% 0 0 1000 600
BSG   t hmw   0.0 400.0   0.8 2.5 dt0
Addlinet hg   0.0 400.0   0.8 2.5 12
WIN% 0 801 1000 1000
BSG   t Kg    0.0 400.0   0.9 1.6 dt0
```

A 3.4 Definition der Fuzzy-Variablen, der Zugehörigkeitsfunktionen und der Regelbasis zur Berechnung des Gemischfüllstandes mit dem fuzzy-basierten Parallelmodell

```
*****
***  Definition der Fuzzy-Variablen, der Zugehörigkeitsfunktionen und der
Operatoren  ***
*****
```

```
DEFLVAR 1  'Druckstörung' 'S2' 1 0 0 0
ADDSET '0'   0.5000 0          0          0.5000 0 1.0000 0 0
ADDSET '1'   0.5000 1.0000    1.0000    0.5000 0 1.0000 0 0
DEFLVAR 2   'dhmw/dt_max' 'S2' 1 0 1 0
ADDSET 'NSG' 0.0020 -0.0090  -0.0068  3.E-04 0 1.0000 6 0
ADDSET 'NG'  3.E-04 -0.0065  -0.0050  0.0010 0 1.0000 0 0
ADDSET 'NM'  0.0010 -0.0040  -0.0030  0.0015 0 1.0000 0 0
ADDSET 'NK'  0.0015 -0.0015  -0.0010  0.0010 0 1.0000 0 6
DEFLVAR 3   'pstör_a' 'S2' 1 0 0 0
ADDSET '1.4' 0.4000 1.4000    1.4000    0.4000 0 1.0000 6 0
ADDSET '1.8' 0.4000 1.8000    1.8000    0.4000 0 1.0000 0 0
ADDSET '2.2' 0.4000 2.2000    2.2000    0.4000 0 1.0000 0 6
DEFLVAR 4   'hmw_stör_a' 'S2' 1 0 0 0
ADDSET '1.05' 0.5000 1.0500    1.0500    0.5000 0 1.0000 6 0
ADDSET '1.55' 0.5000 1.5500    1.5500    0.4000 0 1.0000 0 0
ADDSET '1.95' 0.4000 1.9500    1.9500    0.4000 0 1.0000 0 6
DEFLVAR 5   'Kg' 'S2' 1 0 1 0
ADDSET 'Kg_1' 0.1100 1.0000    1.0000    0.1100 0 1.0000 6 0
ADDSET 'Kg_2' 0.1100 1.1100    1.1100    0.1200 0 1.0000 0 0
ADDSET 'Kg_3' 0.1200 1.2300    1.2300    0.1500 0 1.0000 0 0
ADDSET 'Kg_4' 0.1500 1.3800    1.3800    0.1700 0 1.0000 0 0
ADDSET 'Kg_5' 0.1700 1.5500    1.5500    0.4500 0 1.0000 0 6
```

```
*****
***  Definition des Operators und der Regelbasis  ***
*****
```

```
DEFAND 'T2'
```

```

RULESET 'FC_Kg'
IF 'Druckstörung' = '0' THEN 'Kg' = 'Kg_1'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NK' 'pstör_a' = '1.4' 'hmw_stör_a' =
'1.05' THEN 'Kg' = 'Kg_2'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NK' 'pstör_a' = '1.8' 'hmw_stör_a' =
'1.05' THEN 'Kg' = 'Kg_2'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NK' 'pstör_a' = '2.2' 'hmw_stör_a' =
'1.05' THEN 'Kg' = 'Kg_2'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NG' 'pstör_a' = '1.4' 'hmw_stör_a' =
'1.05' THEN 'Kg' = 'Kg_5'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NSG' 'pstör_a' = '1.8'
'hmw_stör_a' = '1.05' THEN 'Kg' = 'Kg_5'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NSG' 'pstör_a' = '2.2'
'hmw_stör_a' = '1.05' THEN 'Kg' = 'Kg_5'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NG' 'pstör_a' = '2.2' 'hmw_stör_a' =
'1.05' THEN 'Kg' = 'Kg_4'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NM' 'pstör_a' = '2.2' 'hmw_stör_a' =
'1.05' THEN 'Kg' = 'Kg_3'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NM' 'pstör_a' = '1.4' 'hmw_stör_a' =
'1.05' THEN 'Kg' = 'Kg_4'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NK' 'pstör_a' = '1.4' 'hmw_stör_a' =
'1.55' THEN 'Kg' = 'Kg_2'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NK' 'pstör_a' = '1.8' 'hmw_stör_a' =
'1.55' THEN 'Kg' = 'Kg_2'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NK' 'pstör_a' = '2.2' 'hmw_stör_a' =
'1.55' THEN 'Kg' = 'Kg_2'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NM' 'pstör_a' = '1.4' 'hmw_stör_a' =
'1.55' THEN 'Kg' = 'Kg_3'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NG' 'pstör_a' = '1.4' 'hmw_stör_a' =
'1.55' THEN 'Kg' = 'Kg_5'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NSG' 'pstör_a' = '1.4'
'hmw_stör_a' = '1.55' THEN 'Kg' = 'Kg_5'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NSG' 'pstör_a' = '1.8'
'hmw_stör_a' = '1.55' THEN 'Kg' = 'Kg_5'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NSG' 'pstör_a' = '2.2'
'hmw_stör_a' = '1.55' THEN 'Kg' = 'Kg_5'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NK' 'pstör_a' = '1.4' 'hmw_stör_a' =
'1.95' THEN 'Kg' = 'Kg_2'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NK' 'pstör_a' = '1.8' 'hmw_stör_a' =
'1.95' THEN 'Kg' = 'Kg_2'
IF 'Druckstörung' = '1' 'dhmw/dt_max' = 'NK' 'pstör_a' = '2.2' 'hmw_stör_a' =
'1.95' THEN 'Kg' = 'Kg_2'

```

```

IF 'Druckstörung'='1' 'dhmw/dt_max'='NM' 'pstör_a'='1.4' 'hmw_stör_a'='
'1.95' THEN 'Kg'='Kg_3'
IF 'Druckstörung'='1' 'dhmw/dt_max'='NG' 'pstör_a'='1.4' 'hmw_stör_a'='
'1.95' THEN 'Kg'='Kg_4'
IF 'Druckstörung'='1' 'dhmw/dt_max'='NM' 'pstör_a'='2.2' 'hmw_stör_a'='
'1.95' THEN 'Kg'='Kg_2'
IF 'Druckstörung'='1' 'dhmw/dt_max'='NG' 'pstör_a'='2.2' 'hmw_stör_a'='
'1.95' THEN 'Kg'='Kg_3'
IF 'Druckstörung'='1' 'dhmw/dt_max'='NSG' 'pstör_a'='1.4'
'hmw_stör_a'='1.95' THEN 'Kg'='Kg_5'
IF 'Druckstörung'='1' 'dhmw/dt_max'='NSG' 'pstör_a'='1.8'
'hmw_stör_a'='1.95' THEN 'Kg'='Kg_5

```

A 3.5 Programm zur Umsetzung der Umschaltalgorithmen für die kontinuierliche Prozeßbeobachtung

```

*****
*** Parameter ***
*****
* ta= 0.1 s
* te= 200 s ;BD14195, 5 mm
SUM Zeit 0.0 t
VER 1.0 2,8 2.8
*
*****
*** Einlesen der Prozeßdaten (ATHLET) ***
*****
**
XYI 'hmn51495.xy' t hmn5_14195 0.1
XYI 'hg51495.xy' t hg5_14195 0.1
XYI 'hmn51495f.xy' t hmn5_14195f 0.1
XYI '14195hgf.xy' t hg5_14195f 0.1
XYI 'hg4.xy' t hg4 0.1
**
VER hg5_14195 hg_ATH 1.0
VER hg5_14195f hg_FUZ 1.0
VER hmn5_14195 hmn_ATH 1.0

*** Gemischspiegel über/unter Meßbereich
VER hg_ATH UMG 1.0
VER hg_ATH OMG 1.0
*
*****
*** Verläufe für Parallelmodell und Beobachter

```

```

VER hg_fuz hg_PM 1.0
VER hg_4 hg_h_BEO 1.0
*
*****
*** Kriterium für die Umschaltung
OR hg_PM hg_h_BEO hg
*
*****
*** Berechnung des Modellfaktors für die Meßbereichsgrenze ***
*****
FCRUN 'FC0' ;Laden von FC0.set und 2dmat.mat
VER F_MOD F_MOD 1.0
INV F_MOD MF_MOD
*
SUM 1.0 MF_MOD F_M
MUL F_M hmn_f h_berf_m
MUL F_MOD hmn h_berf_uo
SUM h_berf_uo h_berf_m hg_BER_FUZ
*
*****
*** Erkennen Meßbereichsunterschreitung ***
*****
CMP hg f_umg 1,0 1. 0. ;0 wenn h_beh oberhalb 1.0
;1 wenn h_beh unterhalb 1.0
INV f_umg mf_umg
*
* Erkennen Meßbereichsüberschreitung
*****
CMP hg f_omg 2,8 0. 1. ;0 wenn h_beh unterhalb 2.8
;1 wenn h_beh oberhalb 2.8
INV f_omg mf_omg
*
*****
*** Bilden des signals für den berechneten klassischen Füllstand ***
*****
SUM 1.0 mf_umg mf_omg f_m
MUL f_umg hmn h_berk_u
MUL f_omg hmn h_berk_o
MUL f_m hmn_f h_berk_m
SUM h_berk_u h_berk_o h_berk_m hg_BER_K
*

```

*** Bildschirmausgabe ***

*** Bild oben

WIN% 0 10 1000 500

BSG t hg_ATH 50.0 130.0 1.6 3.2 dt 0

ADDLINE t hg_PM 2,8 50.0 130.0 1.6 3.2 12

ADDLINE t hg_h_BEO 2,8 50.0 130.0 1.6 3.2 12

ADDLINE t hmn_ATH 50.0 130.0 1.6 2.2 12

*** Bild unten

WIN% 0 10 1000 500

BSG t hg_BER_K 50.0 130.0 1.6 2.2 dt 0

ADDLINE t hg_BER_FUZ 50.0 130.0 1.6 2.2 12

***Definition der linguistischen Variablen (FC0.set)

DEFLVAR 1 'UMG' 'S2' 1 0 1 0

ADDSET 'U' 0.85000 0.85000 0.85000 0.15000 0 1.00000 6 0

ADDSET 'G' 0.15000 1.00000 1.00000 0.15000 0 1.00000 0 0

ADDSET 'O' 0.15000 1.15000 1.15000 1.65000 0 1.00000 0 6

DEFLVAR 2 'OMG' 'S2' 1 0 1 0

ADDSET 'U' 0.50000 1.80000 1.80000 1.00000 0 1.00000 6 0

ADDSET 'G' 1.00000 2.80000 2.80000 0.20000 0 1.00000 0 0

ADDSET 'O' 0.20000 3.00000 3.00000 0.80000 0 1.00000 0 6

DEFLVAR 3 'F_MOD' 'S2' 1 0 1 0

ADDSET 'K' 0.50000 0.00000 0.00000 0.50000 0 1.00000 6 0

ADDSET 'M' 0.50000 0.50000 0.50000 0.50000 0 1.00000 0 0

ADDSET 'G' 0.50000 1.00000 1.00000 0.50000 0 1.00000 0 6

DEFAND 'T2'

FCDEF 'FC0' UMG OMG F_MOD '2dmat'

*Regelmatrix 2dmat für F_MOD

'G' 'G' 'G'

'M' 'M' 'G'

'K' 'M' 'G'